



# Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

**Διπλωματική Εργασία**

**Μελέτη Αντοχής σε διάβρωση χάλυβα υψηλής  
αντοχής σε θαλάσσιο περιβάλλον – Επίδραση  
διαβρωτικών συνθηκών στις μηχανικές ιδιότητες**

Δουμένης Παρασκευάς – Νικόλαος



Επιβλέπουσα Διπλωματικής: Καθηγήτρια Π.Βασιλείου

Ιούλιος 2019



# Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών

**Διπλωματική Εργασία**

**Μελέτη Αντοχής σε διάβρωση χάλυβα υψηλής  
αντοχής σε θαλάσσιο περιβάλλον – Επίδραση  
διαβρωτικών συνθηκών στις μηχανικές ιδιότητες**

Δουμένης Παρασκευάς Νικόλαος



Επιβλέπουσα Διπλωματικής: Καθηγήτρια Π.Βασιλείου

Καθηγητής Δ.Μανωλάκος

Καθηγητής Α.Μαρκόπουλος

Ιούλιος 2019

## Contents

<b>Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο</b> .....	1
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών .....	1
<b>Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο</b> .....	2
Σχολή Μηχανολόγων Μηχανικών .....	2
<b>Ευχαριστίες</b> .....	6
<b>Περίληψη</b> .....	7
<b>Abstract</b> .....	9
<b>Εισαγωγή</b> .....	11
<b>A. Θεωρητικό μέρος</b> .....	13
1.1 Μηχανικές ιδιότητες μετάλλων .....	13
1.2 Μεταλλικά κράματα .....	15
1.3 Οι χάλυβες κατασκευών .....	16
1.4 Χάλυβας .....	17
1.5 Ναυπηγικοί χάλυβες .....	18
1.6 Ιστορική εξέλιξη και χρήση χαλύβων στη Ναυπηγική .....	20
1.7 Σύγκριση χαλύβων ΑΗ32 – ΑΗ36 .....	21
1.8 Ο ναυπηγικός χάλυβας ΑΗ36 .....	22
2 Κατεργασίες .....	24
2.1 Υδροκοπή .....	24
2.2 Ψηγματοβολή .....	27
2.3 Ελεύθερη Λείανση / Στίλβωση .....	30
2.4 Δοκιμή εφελκυσμού .....	35
3 Φαινόμενα διάβρωσης και Ηλεκτροχημεία .....	37
3.1 Ορισμός - Γενικά χαρακτηριστικά του φαινομένου .....	38
3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των μετάλλων .....	40
3.3 Ηλεκτροχημεία της διάβρωσης .....	41
3.4 Θερμοδυναμική της διάβρωσης .....	44
3.5 Τρόποι αντιμετώπισης φαινομένων θαλάσσιας διάβρωσης .....	46
3.6 Καθοδική προστασία .....	49
3.7 Προβλήματα καθοδικής προστασίας .....	51
3.8 Τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων .....	52
4 Διάβρωση με αλατονέφωση .....	52
4.1 Διάταξη αλατονέφωσης .....	54
5 Λουτρό εμβάπτισης NaCl .....	55
6 Μέθοδοι εξέτασης της μικροδομής χάλυβα .....	57

6.1	Μελέτη μικροδομής με οπτικό μικροσκόπιο.....	57
6.2	Είδη Φασματοσκοπίας.....	58
6.3	Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης S.E.M – Δομή του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.....	59
6.4	Επιλογή και προετοιμασία δείγματος .....	62
6.5	Παρατήρηση και αποτελέσματα.....	62
<b>A. Πειραματικό μέρος .....</b>		<b>63</b>
7.	Μεταλλογραφική ανάλυση μικροδομής χάλυβα .....	63
7.1	Πειραματική διαδικασία .....	64
7.2	Κοπή του αρχικού τεμαχίου .....	64
7.3	Εγκιβωτισμός.....	65
7.4	Λείανση .....	65
7.5	Καθαρισμός επιφανειών με χρήση υπερήχων .....	67
7.6	Χημική προσβολή.....	68
7.7	Χημική προσβολή με Nital .....	68
7.8	Παρατήρηση στο μικροσκόπιο .....	70
7.9	Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα.....	80
8.	Πείραμα εμβάπτισης σε λουτρό NaCl.....	81
8.1	Διάταξη πειράματος εμβάπτισης δοκιμίων μικρών διαστάσεων για μελέτη απώλειας μάζας .....	82
8.2	Εκτέλεση πειράματος εμβάπτισης δοκιμίων μικρών διαστάσεων .....	83
8.3	Εμβάπτιση δοκιμίων μικρών διαστάσεων με αστάρι.....	85
8.4	Εμβάπτιση δοκιμίων μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι.....	86
8.5	Παρατηρήσεις και συμπεράσματα εμβάπτισης δοκιμίων μικρών διαστάσεων .....	88
8.6	Διάταξη πειράματος εμβάπτισης δοκιμίων .....	91
8.7	Εκτέλεση πειράματος εμβάπτισης δοκιμίων .....	92
8.8	Μελέτη μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων με αστάρι λόγω εμβάπτισης σε λουτρό NaCl .....	94
8.9	Αναλυτική παρουσίαση μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων με αστάρι λόγω εμβάπτισης σε λουτρό NaCl με χρήση λογισμικού TableCurve - Excel .....	103
8.10	Μελέτη μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων χωρίς αστάρι λόγω εμβάπτισης σε λουτρό NaCl.....	107
8.11	Αναλυτική παρουσίαση μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων χωρίς αστάρι λόγω εμβάπτισης σε λουτρό NaCl με χρήση λογισμικού TableCurve-Excel .....	114
9.	Πείραμα αλατονέφωσης.....	117
9.1	Διάταξη πειράματος αλατονέφωσης δοκιμίων μικρών διαστάσεων για μελέτη απώλειας μάζας .....	118



9.2	Εκτέλεση πειράματος αλατονέφωσης δοκιμίων μικρών διαστάσεων.....	120
9.3	Διάβρωση δοκιμίων μικρών διαστάσεων με αστάρι σε θάλαμο αλατονέφωσης ....	122
9.4	Διάβρωση δοκιμίων μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι σε θάλαμο αλατονέφωσης	123
9.5	Παρατηρήσεις και συμπεράσματα διάβρωσης δοκιμίων μικρών διαστάσεων σε θάλαμο αλατονέφωσης .....	125
9.6	Διάταξη πειράματος αλατονέφωσης δοκιμίων .....	129
9.7	Εκτέλεση πειράματος αλατονέφωσης δοκιμίων .....	130
9.8	Μελέτη μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων με αστάρι λόγω διάβρωσης στο θάλαμο αλατονέφωσης .....	131
9.9	Αναλυτική παρουσίαση μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων με αστάρι λόγω διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης με χρήση λογισμικού TableCurve-Excel .....	136
9.10	Μελέτη μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων χωρίς αστάρι λόγω διάβρωσης στο θάλαμο αλατονέφωσης .....	139
9.11	Αναλυτική παρουσίαση μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων χωρίς αστάρι λόγω διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης με χρήση λογισμικού TableCurve-Excel .....	144
	Βιβλιογραφία	
	Παράρτημα	

## Ευχαριστίες

Η παρούσα διπλωματική εργασία εκπονήθηκε στο εργαστήριο Φυσικοχημείας και εφαρμοσμένης Ηλεκτροχημείας, του τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών, της σχολής Χημικών Μηχανικών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Προσωπικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα την επιβλέπουσα καθηγήτρια της διπλωματικής μου εργασίας, κυρία **Παναγιώτα Βασιλείου**, διευθύντρια του τομέα Επιστήμης και Τεχνικής των Υλικών και του εργαστηρίου Φυσικοχημείας και Εφαρμοσμένης Ηλεκτροχημείας, για τη δυνατότητα που μου έδωσε να αφοσιωθώ με την εκπόνηση του συγκεκριμένου θέματος, το οποίο συμβαδίζει σε μεγάλο βαθμό με τα επιστημονικά μου ενδιαφέροντα. Καθ'όλη τη διάρκεια της διπλωματικής, η συνεισφορά και καθοδήγησή της ήταν κομβικής σημασίας τόσο σχετικά με τον προγραμματισμό και την υλοποίηση των πειραματικών διαδικασιών όσο και στην ενθάρρυνση δοκιμής νέων μεθόδων και στην επίλυση των αποριών που προέκυπταν κατά τη διάρκεια ολοκλήρωσης των φάσεων της διπλωματικής μου εργασίας .

Θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τα μέλη της διμελούς επιτροπής, καθηγητές **Δημήτριο Μανωλάκο** και **Άγγελο Μαρκόπουλο** για το χρόνο,την προσοχή και την αφοσίωση που επέδειξαν για την εξέταση και αξιολόγηση της διπλωματικής μου εργασίας. Ο ρόλος τους ήταν πολύ σημαντικός εως και καταλυτικός ώστε να καταφέρω να ολοκληρώσω με άρτιο τρόπο το έργο μου.

Ιδιαίτερα για τον καθηγητή κύριο **Δημήτρη Μανωλάκο**, θα ήθελα να εκφράσω τον απεριόριστο σεβασμό και την εκτίμηση μου, καθώς σε κάθε πρόβλημα που μου προέκυπτε ήταν δίπλα μου ώστε να με βοηθήσει να αντιμετωπίσω την κάθε δυσκολία με τον πιο αποτελεσματικό και μεθοδικό τρόπο. Συνέβαλε απλόχερα και ανιδιοτελώς από το να με κατευθύνει στην επιλογή της διπλωματικής εργασίας, μέχρι την παροχή υλικού, προσωπικού και απαραίτητων κατεργασιών.

Επιπλέον, θα ήθελα να ευχαριστήσω ιδιαίτερα τον υποψήφιο διδάκτορα της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών του τομέα Επιστήμης των υλικών κύριο **Ιωάννη Παπαντωνίου** για τις συμβουλές που ανιδιοτελώς μου έδωσε καθώς και το χρόνο που αφιέρωσε στο πειραματικό μέρος της διπλωματικής μου εργασίας.

Επίσης, θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στους υποψήφιους διδάκτορες της σχολής Χημικών Μηχανικών κ.**Μιχάλη Δελαγραμμάτικα** και κ.**Όλγα Παπαδοπούλου** για την καθημερινή και πολύ καθοριστική συμβολή τους στην πορεία της διπλωματικής μου εργασίας. Τολμώ να πω πως χωρίς εκείνους θα ήταν αδύνατη η ολοκλήρωση του έργου μου.

Φυσικά, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά όλη μου την οικογένεια, τους συγγενείς και φίλους μου , που με το δικό τους μοναδικό τρόπο συνέβαλαν ουσιαστικά ώστε να μπορώ σε καθημερινή βάση να είμαι αφοσιωμένος στο σπουδαστικό μου έργο. Χωρίς την αδιάκοπη και ανιδιοτελή τους αγάπη και στήριξη δεν θα μπορούσα να βρίσκομαι στο σημείο που βρίσκομαι σήμερα. Τέλος , θα ήθελα να αφιερώσω την παρούσα διπλωματική, μέσα από τα βάθη της καρδιάς μου στην πολυαγαπημένη μου θεία , **Αθηνά** ,που με την αγάπη της και τη συνεχή της καθοδήγηση σε όλους τους τομείς της ζωής μου, μου έδωσε θάρρος, όραμα και αισιοδοξία ώστε να πορευτώ στο μέλλον με το κεφάλι ψηλά. Ήμουν, είμαι και θα είμαι πολύ περήφανος για εκείνη.

## Περίληψη

Υστερα από μελέτες που πραγματοποιήθηκαν, διαπιστώθηκε ότι αρκετά πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου παρουσίασαν έντονη διάβρωση στις μεταλλικές επιφάνειες του περιφερειακού τους σκελετού και του εξωτερικού πυθμένα. Να σημειωθεί ότι οι επιφάνειες αυτές αποτελούνται από χάλυβα υψηλής αντοχής και έρχονται σε άμεση επαφή με το θαλάσσιο περιβάλλον για μεγάλο χρονικό διάστημα και συγκεκριμένα για όλο τον κύκλο ζωής του πλοίου. Στην παρούσα διπλωματική εργασία έγινε πειραματική διερεύνηση της μηχανικής συμπεριφοράς και της συμπεριφοράς σε διάβρωση του ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής με εμπειρική ονομασία AH36. Πρόκειται για το είδος του χάλυβα που χρησιμοποιείται σήμερα σε αρκετά πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου, τόσο λόγω των βελτιωμένων μηχανικών του ιδιοτήτων σε σύγκριση με παλαιότερους χάλυβες αλλά και λόγω του σχετικά μικρού του βάρους για δεδομένο πάχος. Σε πρώτη φάση, γίνεται μια γενική αναφορά στα μέταλλα και τις ιδιότητές τους καθώς και στα μεταλλικά κράματα και τους παράγοντες εκείνους που επιδρούν κατά κύριο λόγο στη μεταβολή των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Στη συνέχεια, αναλύονται συνοπτικά το σύνολο των κατεργασιών που πραγματοποιούνται στις μεταλλικές κατασκευές καθώς και τα μεταλλικά εξαρτήματα δίνοντας κυρίως έμφαση στην υποκατηγορία των μηχανικών κατεργασιών που χρησιμοποιήθηκαν για την υλοποίηση της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Σε επόμενο κεφάλαιο αναλύεται το φαινόμενο της διάβρωσης, η θερμοδυναμική και η ηλεκτροχημεία της διάβρωσης καθώς και οι μηχανισμοί της, οι αρχές των μεθόδων και κατεργασιών που αξιοποιήθηκαν. Στο τέλος αυτού του κεφαλαίου, παρατίθενται διάφοροι τρόποι αντιμετώπισης του φαινομένου της θαλάσσιας διάβρωσης, δίνοντας έμφαση σε μια από τις πιο συχνά εφαρμοζόμενες μεθόδους, την καθοδική προστασία. Ενδιάμεσα στα ανωτέρω, γίνεται αναφορά στις συνθήκες λειτουργίας των φορτηγών πλοίων μεταφοράς ξηρού φορτίου και τα κατασκευαστικά μέρη που υποφέρουν περισσότερο από ελάττωση πάχους από διάβρωση και άλλους παράγοντες. Συνοπτικά παρουσιάζονται αποτελέσματα λόγω φαινομένων διάβρωσης από προηγούμενες έρευνες που αφορούν τη μεταφορά πορώδους μέσου με πλοία του ίδιου τύπου. Σε επόμενο στάδιο γίνεται αναλυτική παρουσίαση των δύο βασικών πειραματικών μεθόδων θαλάσσιας διάβρωσης, της εμβάπτισης σε λουτρό NaCl καθώς και της έκθεσης σε θάλαμο αλατονέφωσης. Με τις δύο αυτές μεθόδους, έγινε όσο το δυνατόν καλύτερη προσομοίωση των συνθηκών λειτουργίας του ελάσματος εξωτερικού πυθμένα και της γάστρας του πλοίου, που είναι κατασκευασμένα από ναυπηγικό χάλυβα AH36. Επιπρόσθετα, γίνεται αναφορά στις μεθόδους που χρησιμοποιούνται ευρύτατα για την εξέταση της μικροδομής του χάλυβα. Πριν την εξέταση της μικροδομής των χαλύβδινων δοκιμών προηγήθηκε κατεργασία λείανσης/στίλβωσης των επιφανειών, η οποία υλοποιήθηκε σε διαδοχικά στάδια. Σκοπός της διαδικασίας αυτής ήταν η σταδιακή λείανση των χαλύβδινων επιφανειών μέχρι αυτές να γίνουν «καθρέφτες». Στη συνέχεια ακολούθησε καθαρισμός των επιφανειών αυτών από τυχόν επικαθίσεις αποβλίττων με τη βοήθεια υπερήχων (ultrasonic) καθώς και η χημική προσβολή των δοκιμών με χρήση Nital ώστε να έχουμε πιο ευκρινή αποτελέσματα κατά την οπτική παρακολούθηση με χρήση οπτικού μικροσκοπίου. Με τη βοήθεια της μεταλλογραφίας μπορέσαμε να εντοπίσουμε στην επιφάνεια των χαλύβδινων δοκιμών προς εξέταση τις φάσεις του χάλυβα καθώς και την έναρξη αστοχίας και τη μορφή αυτής. Γίνεται αναφορά στη μέθοδο της φασματοσκοπίας και πως αυτή πραγματοποιείται και στη συνέχεια περιγράφεται λεπτομερώς η μέθοδος της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας Σάρωσης (S.E.M). Στη χρήση της μεθόδου S.E.M στηρίχτηκε μέρος της πειραματικής διαδικασίας με σκοπό την εξέταση της περιοχής θραύσης κι

επομένως το χαρακτηρισμό του είδους της αστοχίας που επετεύχθη στην περιοχή του «λαιμού» των μεταλλικών δοκιμών από χάλυβα υψηλής αντοχής AH36. Ανάλογα με το είδος της αστοχίας που πραγματοποιήθηκε (όλκιμη ή ψαθυρή θραύση, εμφάνιση πορώδους στην ευρύτερη περιοχή της θραύσης πριν την αστοχία του υλικού κλπ) μπορούμε να αποφανθούμε σχετικά με τη συνολική ενέργεια ( $E_{UTS}$ ) που απαιτήθηκε να καταναλωθεί ώστε να φτάσουμε στη μέγιστη τάση θραύσης των δοκιμών και άρα να έχουμε την έναρξη της αστοχίας του υλικού. Προφανώς, όσο πιο ψαθυρή κρίνεται η θραύση ενός δοκιμίου και επιπρόσθετα πιο διαβρωμένη είναι η ευρύτερη περιοχή της θραύσης, θα απαιτείται σχετικά μικρότερη  $E_{UTS}$  για την έναρξη θραύσης των δοκιμών. Τα αποτελέσματα της διάβρωσης των χαλύβδινων δοκιμών συναρτήσει του χρόνου έκθεσης, μετατράπηκαν σε διαγράμματα μετρήσεων απώλειας μάζας ως προς τη συνολική επιφάνεια διάβρωσης συναρτήσει του χρόνου έκθεσης κατά τα πρότυπα. Μια άλλη κατηγορία δοκιμών επίσης μαθηματικοποιήθηκε σε διαγράμματα όπου στον άξονα (y) τοποθετήθηκαν οι μέσες τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων (όριο διαρροής  $\sigma_y$ , μέγιστη εφελκυστική τάση  $\sigma_{UTS}$ ) κατάλληλα ομαδοποιημένων δοκιμών συγκριτικά με τις μηχανικές ιδιότητες των αρχικών blank δοκιμών, ενώ στον άξονα (x) τοποθετήθηκαν κατά τα γνωστά τα χρονικά διαστήματα διάβρωσης των δοκιμών. Όσον αφορά την τάση θραύσης των δοκιμών, αυτή προσεγγίστηκε με τον real engineering τρόπο και αποτυπώθηκε με τη χρήση ραβδογραμμάτων από κατάλληλη επεξεργασία των δεδομένων σε λογιστικό φύλλο excel. Αξίζει να σημειωθεί, πως η διατομή των δοκιμών έπρεπε να μελετηθεί ξεχωριστά και στην περίπτωση της θραύσης έπρεπε να υπολογιστεί η διατομή του λαιμού στην περιοχή αυτή. Αντίθετα, για τη μελέτη του engineering διαγράμματος τάσης – παραμόρφωσης η διατομή των δοκιμών παρέμενε πρακτικά σταθερή σε όλη τη μελέτη και ίση με τη διατομή του λαιμού μετά το πέρας του χρόνου έκθεσης των δοκιμών και πριν την έναρξη της μηχανικής τους καταπόνησης. Ο συνολικός χρόνος έκθεσης των δοκιμών βασίστηκε σε πρότυπα διάβρωσης μεταλλικών κατασκευών. Αυτός συνήθως κυμαίνεται στην αφαίρεση δοκιμών κάθε 2 ως 4 εβδομάδες έκθεσης σε διαβρωτικές συνθήκες, ανάλογα τη μέθοδο διάβρωσης που χρησιμοποιείται. Σχετικά με τις καμπύλες απώλειας μάζας και μεταβολής των μέσων μηχανικών ιδιοτήτων, έγινε προσπάθεια να προσεγγιστούν με καμπύλες που μαθηματικοποιούν τους μηχανισμούς και όχι καμπύλες που απλά προσεγγίζουν τα σημεία χωρίς μεγάλη απόκλιση. Στη συνέχεια συσχετίστηκε η οπτική παρατήρηση της επιφάνειας των δοκιμών με τη μορφή της καμπύλης στην οποία το καθένα αντιστοιχούσε. Τέλος, στο Παράρτημα της παρούσης διπλωματικής εργασίας παρουσιάζονται οι πίνακες μεταβολής τόσο του πάχους των δοκιμών μετά το πέρας του χρόνου έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον καθώς και της διατομής πριν και μετά τη μηχανική τους καταπόνηση.

## Abstract

Following studies carried out, several dry-cargo ships were found to have intense corrosion on the metal surfaces of their peripheral skeleton and the outer bottom. It must be mentioned that these surfaces are made of high strength steel and come in contact with the marine environment for a long time and in particular for the whole circle of life of the ship. In this diploma thesis we made an experimental investigation of the mechanical behavior and the corrosion behavior of high strength shipbuilding steel with the empirical name AH36. This is the kind of steel currently used on several dry cargo ships, both because of its improved mechanical properties compared to older steels and because of its relatively low weight for a given thickness. Initially, a general reference is made to metals and their properties as well as to metal alloys and those factors that primarily affect the change in their mechanical properties. Subsequently, we briefly analyze all the mechanical processes of the metal constructions as well as the metal parts, focusing mainly on the subclass of machining processes used for the implementation of this diploma thesis. In the next chapter we analyze the phenomenon of corrosion, thermodynamics and electrochemistry of corrosion as well as its mechanisms, the principles of the methods and processes used. At the end of this chapter, various ways of dealing with the phenomenon of marine erosion are apposed, emphasizing on one of the most commonly applied methods, cathodic protection. In the above, reference is made to the operating conditions of dry cargo carriers and the components that suffer most from thickness reduction because of corrosion and other factors. In summary, results from corrosion phenomena from previous surveys concerning the porosity transfer of ships of the same type are presented. Continuing, the two basic experimental methods of marine erosion, NaCl solution immersion and exposure to salt spray chamber are presented. With these two methods, the operating conditions of the outer bottom plate and the hull of the ship, made of AH36 shipbuilding steel, were optimally simulated. In addition, reference is made to the methods widely used for examining the microstructure of steel. Before the examination of the microstructure of the steel specimens, a grinding / polishing treatment of the surfaces was carried out in successive stages. The purpose of this process was the gradual grinding of the steel surfaces until they become "mirrors". Thereafter, these surfaces were cleaned from any deposits of waste with an ultrasonic generating machine. Finally, a chemical attack with Nital was realized to specimens, in order to have more visible results in visual observation using an optical microscope. Using metallography, we were able to identify the steel phases as well as the start of the failure and its format. An extensive reference is made to the spectroscopy method and how it is performed and then details of the methods of Electronic Scanning Microscopy (S.E.M). In using the S.E.M method, a part of the experimental procedure was used to examine the fracture area and thus to characterize the type of failure achieved in the "throat" area of the AH36 high strength steel specimens. Depending on the type of failure (ductile or brittle fracture, the appearance of porosity in the wider area of breakage before material failure, etc.), we can decide on the total energy ( $E_{UTS}$ ) required to be consumed to reach the maximum failure strain of the specimens and thus have the beginning of the failure of the material. Obviously, the more brittle the failure of a specimen is and the more corroded the wider the fracture area, the relatively smaller the  $E_{UTS}$  will be required to start breaking the specimens. The corrosion effects of the steel specimens as a function of exposure time were converted into mass loss diagrams for the total corrosion surface area as a function of standard exposure time. Another category of specimens was also mathematically plotted on axis ( $y$ ) with the mean values of mechanical properties (yield strength  $\sigma_y$  maximum tensile

stress  $\sigma_{UTS}$ ) of properly grouped specimens compared to the mechanical properties of the original blank specimens, while the corrosion time of the specimens was placed on the (x) axis. Concerning about the failure strain of the specimens this was approached in the real engineering way and was described using bar charts from the proper processing of the data in an excel spreadsheet. It is worth mentioning that the specimens surface had to be studied separately and in the case of failure the surface of the neck had to be calculated separately. In contrast, for the study of the stress-strain engineering diagram the specimen surface remained practically fixed throughout the study and equal to the surface area of the specimen after the exposure time and before mechanical stress was applied. The total exposure time of the specimens was based on corrosion patterns of metal structures. This usually varies in removing specimens every 2 or 4 weeks of exposure to corrosive conditions. Concerning about the mass loss curves and average mechanical properties, an attempt was made to approach curves that mathematicize the mechanisms rather than curves that simply approach the points without much deviation. The visual observation of the surface of the specimens was then correlated in the form of the curve in which each corresponded. Finally, the Appendix to this thesis presents tables showing the changes in both the thickness of the specimens after the exposure time to a corrosive environment and the surface before and after mechanical stress.

## Εισαγωγή<sup>1</sup>

Τα τελευταία χρόνια, όλο και περισσότερες συζητήσεις πραγματοποιούνται γύρω από επιστημονικές μελέτες που πραγματεύονται τόσο φαινόμενα διάβρωσης μεταλλικών κατασκευών, όσο και τις αντίστοιχες οικονομικές επιπτώσεις που αυτά επιφέρουν σε εθνικό ή και διεθνές επίπεδο. Παρουσιάζεται μάλιστα ως οικονομικό πρόβλημα που σε μεγάλο βαθμό παραμένει άλυτο και ποσοτικοποιείται ως συγκρινόμενο ποσοστό του Ακαθάριστου Εθνικού Προϊόντος.

Παρά τους συνεχείς ελέγχους και τις αδιάκοπες εξετάσεις του ζητήματος της διάβρωσης των μεταλλικών κατασκευών, κάποια προβλήματα παραμένουν άλυτα και είναι αυτά που με μαθηματική ακρίβεια οδηγούν στη σταδιακή απαξίωση όλων των τεχνικών μέσων που επέρχεται αναπόφευκτα με τη χρήση τους ή με την πάροδο του χρόνου ή του συνδυασμού τους. Από τα ανωτέρω συνεπάγεται ότι το πρόβλημα της διάβρωσης των μεταλλικών κατασκευών δεν μπορεί να λυθεί οριστικά, αφού το ίδιο το φαινόμενο της διάβρωσης αποτελεί τη διαφαινόμενη έκφραση της ουσίας, που δεν είναι άλλη από τη συνεχή μεταβολή της ύλης. Παρόλα αυτά, το γεγονός πως η διάβρωση θεωρείται αναπόφευκτη δεν συνεπάγεται σε καμία περίπτωση το προκαθορισμένο της εξέλιξής της και αυτό γιατί ο ανθρώπινος παράγοντας μπορεί να διαδραματίσει καθοριστικό ρόλο στη ρύθμιση, την επιτάχυνση ή την επιβράδυνση της προαναφερθείσας διαδικασίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της παρέμβασης του ανθρώπου στην εξέλιξη του φαινομένου και στις επιδράσεις του είναι η ανάπτυξη μεθόδων προστασίας των μεταλλικών κατασκευών έναντι διάβρωσης. Οι παρεμβάσεις αυτές είναι ικανές να περιορίσουν το πρόβλημα που προκύπτει από τη διάβρωση σε τέτοιο βαθμό που η εξέλιξη του φαινομένου να μην είναι αισθητή με την πάροδο μερικών χρόνων, αλλά ακόμα και όταν πραγματοποιήσει την εμφάνισή της, οι επιπτώσεις να είναι ελέγξιμες, μη καταστροφικές και αντιστρέψιμες εντός αποδεκτών οικονομικών κριτηρίων. Ακόμα και στις περιπτώσεις όπου η λήψη μέτρων για την αντιμετώπιση των προβλημάτων λόγω των φαινομένων διάβρωσης δεν συμφέρει οικονομικά, η μελέτη του φαινομένου μπορεί να μας δώσει χρήσιμες απαντήσεις σχετικά με την επικείμενη έκταση που αυτό μπορεί να πάρει, καθώς και να συμβάλλει στην πρόβλεψη των συνεπειών ώστε να διασφαλίζεται εκ των προτέρων η βιωσιμότητα του έργου σε δεδομένο βάθος χρόνου ή κύκλων λειτουργίας. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αυτής της προμελέτης που αναφέρθηκε αποτελεί ο προσδιορισμός του πάχους εξαρτημάτων του πλοίου που υπάρχει σε σχετικούς κανονισμούς και τυποποιήσεις ώστε να επιτυγχάνεται επαρκής αντοχή μετά από συγκεκριμένους κύκλους λειτουργίας. Επίσης, έχουν αναπτυχθεί σχετικά εγχειρίδια τα οποία προδιαγράφουν συγκεκριμένα βήματα και ενέργειες στις οποίες πρέπει να προβούν οι αρμόδιοι για να επιδιορθώσουν τυχόν προβλήματα που εμφανίζονται λόγω φαινομένων διάβρωσης και όχι μόνο.

Αν παρατηρήσει κανείς το σύνολο της κατασκευής του πλοίου μπορεί εύκολα να διαπιστώσει πως αυτό αποτελεί ένα σύνολο συνεργαζόμενων μερών των οποίων η συναρμογή μεταξύ τους μπορεί να είναι είτε κοχλιωτή, είτε συγκολλητή. Κάποια από τα πιο βασικά μέρη που απαρτίζουν ένα συμβατικό πλοίο, είναι η κελυφωτή κατασκευή (η οποία

---

[1] <sup>1</sup> Καρύδης, Π. (2002). Επιθεώρηση, Συντήρηση Και Επισκευή Της Μεταλλικής Κατασκευής Του Πλοίου. Αθηνά: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.

[2] [http://www.harbour-aritime.com/uploads/1/2/9/8/12987200/bulk\\_carrier\\_practice.pdf](http://www.harbour-aritime.com/uploads/1/2/9/8/12987200/bulk_carrier_practice.pdf)



συνήθως είναι μεταλλική) και μπορεί να χωρισθεί σε γάστρα και υπερκατασκευές, η εγκατάσταση πρόωσης που περιλαμβάνει μία ή περισσότερες μηχανές εσωτερικής καύσης και το σύστημα μετάδοσης και μετατροπής της ενέργειας σε ώση ενώ συγχρόνως υπάρχουν πολλά ακόμα βοηθητικά υποσυστήματα που παίζουν καθοριστικό ρόλο στη σωστή λειτουργία του πλοίου. Είναι κατανοητό πως καθώς αυξάνονται οι κύκλοι λειτουργίας των μεταλλικών κυρίως μερών ενός πλοίου, τόσο αυτά φθείρονται ενώ σταδιακά μπορούν και να αστοχήσουν, γεγονός που θέλουμε πάσει θυσία να αποτρέψουμε σήμερα. Προφανώς, ανάλογα τη σημαντικότητα και τη λειτουργία κάποιου συνεργαζόμενου μέρους, τόσο μεγαλύτερη σημασία πρέπει να επιδεικνύουμε για τη συντήρηση και την προστασία του έναντι των διαβρωτικών συνθηκών που επικρατούν σε ένα θαλάσσιο περιβάλλον. Επίσης, πολύ σημαντικό ρόλο στην προστασία των μεταλλικών μερών παίζουν και τα τοπογραφικά κριτήρια, δηλαδή οι περιοχές που τα μηχανικά εξαρτήματα καλύπτουν σε ένα πλοίο. Άλλη προστασία προφανώς θα χρειαστεί ένα μηχανολογικό εξάρτημα που βρίσκεται στα αμπάρια του πλοίου, τα οποία είναι στεγανά και άλλη προστασία ένα εξάρτημα που βρίσκεται σε επαφή με το θαλασσινό νερό και άρα ο ρυθμός διάβρωσής του είναι πολύ μεγαλύτερος. Αξίζει να αναφερθεί ότι δεν είναι λίγα τα εξαρτήματα που εξαρχής δεν προορίζονται να αντέξουν εφ'όρου ζωής σε ένα πλοίο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι θυσιαζόμενες άνοδοι που χρησιμοποιούνται για την καθοδική προστασία της γάστρας, τα φίλτρα καυσίμων και λαδιών στο μηχανοστάσιο ακόμα και οι προστατευτικές επιστρώσεις των δεξαμενών.

Είναι γνωστό, πως υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες οι φθορές στα ελάσματα είναι πολύ μεγάλης έκτασης ή το πάχος ορισμένων εξαρτημάτων έχει μειωθεί αισθητά λόγω διάβρωσης ή άλλων μηχανικών αιτιών. Σε τέτοιες περιπτώσεις, για λόγους ασφάλειας και καμιά φορά λόγω οικονομίας, κρίνεται σκόπιμη η εξ'ολοκλήρου αντικατάσταση του προβληματικού ελάσματος ή του εξαρτήματος με νέο μεγαλύτερου πάχους. Το κόστος και η δυσκολία αντικατάστασης εξαρτάται ανάμεσα σε άλλους παράγοντες και από το σημείο του πλοίου που γίνεται. Για παράδειγμα, άλλο κόστος απαιτείται για την αντικατάσταση ενός ελάσματος που βρίσκεται στην έξαλο ζώνη ενός πλοίου, άλλο στην ίσαλο και άλλο στην ύφαλο. Είναι κατανοητό πως το κόστος αυξάνεται αναλογικά με τη δυσκολία αντικατάστασης ενός συγκεκριμένου μηχανολογικού εξαρτήματος. Συνεπώς ο σωστός σχεδιασμός αυτών των περιοχών αλλά και η κατάλληλη συντήρησή τους είναι ύψιστης σημασίας για τη μακροζωία του πλοίου.

Είναι αποδεκτή η άποψη πως το πλοίο για να εκτελεί τις αποστολές του, πρέπει τα μέρη από τα οποία αποτελείται να είναι λειτουργικά και καλά συντηρημένα ενώ αντίστοιχα απαξιώνεται όταν τα μέρη του παύουν να ικανοποιούν τις απαιτήσεις ορθής λειτουργίας. Σε αυτή την περίπτωση κρίνεται αν συμφέρει οικονομικά περισσότερο να πραγματοποιηθεί επισκευή της βλάβης ή αντικατάσταση των ελλαττωματικών μερών. Η συντήρηση δεν είναι πάντα το ίδιο εύκολο και οικονομικό να γίνει. Όσο μεγαλύτερη είναι η φθορά του πλοίου και κατ'επέκταση των μερών του, τόσο μεγαλύτερό είναι και το κόστος για να γίνει μια σωστή συντήρηση. Σε περίπτωση που το κόστος επιδιόρθωσης μιας βλάβης υπερβαίνει το κόστος που απαιτείται για την αντικατάσταση των προβληματικών εξαρτημάτων, λέμε ότι έχει επέλθει απαξίωση των συγκεκριμένων μηχανικών εξαρτημάτων και κρίνεται μείζονος σημασίας η άμεση αντικατάστασή τους μέχρι το πλοίο να τεθεί ξανά σε λειτουργία και να μπορεί να φέρνει εις πέρας με άνεση το έργο του. Από τα παραπάνω μπορεί εύκολα να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι η διάβρωση πέρα από το κόστος της απώλειας υλικού είναι ικανή να επιφέρει και άλλες πιο σημαντικές επιπτώσεις σε περιπτώσεις που δεν παρθούν τα απαραίτητα μέτρα. Παρ'όλα αυτά, είναι συνετό να πραγματοποιείται κάθε φορά η βέλτιστη οικονομική εκμετάλλευση ενός πλοίου τόσο για τη συντήρηση όσο και την επισκευή ή

αντικατάσταση μηχανικών μερών που έχουν υποστεί βλάβη, ώστε ταυτόχρονα με την εξασφάλιση της ασφαλούς λειτουργίας του πλοίου και της μακροζωίας του, να αποτρέπουμε τυχόν οικονομικές σπατάλες κάθε φορά.

## A. Θεωρητικό μέρος

### 1.1 Μηχανικές ιδιότητες μετάλλων<sup>2</sup>

#### **Μέτρο Ελαστικότητας**

Το μέτρο ελαστικότητας εκφράζει την ακαμψία ενός υλικού και αντιστοιχεί σε λόγο τάσης προς παραμόρφωση όταν αυτό υπόκειται στην ελαστική περιοχή. Το μέγεθος αυτό μπορεί να αξιοποιηθεί ως ένδειξη για την αντοχή των ατομικών δεσμών στα κρυσταλλικά υλικά.

#### **Όριο Αντοχής Σε Εφελκυσμό (Tensile Strength)**

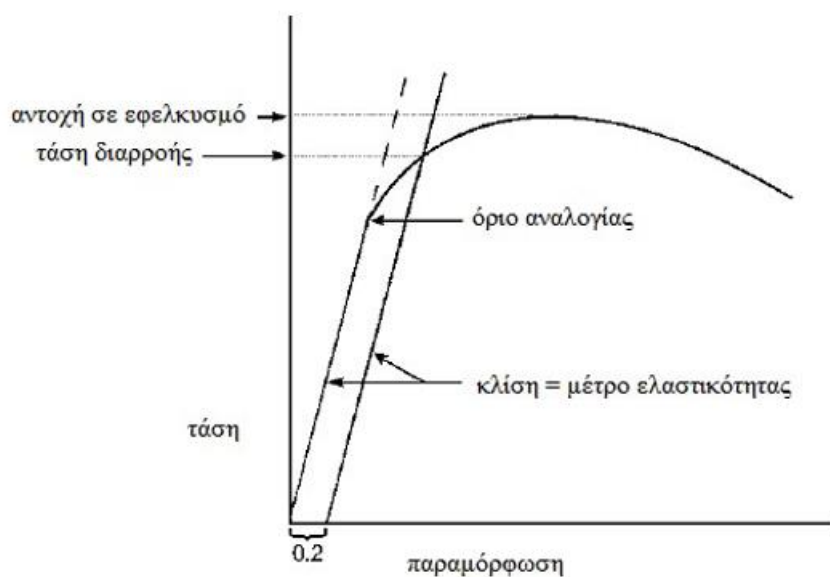
Το όριο αντοχής αντιστοιχεί στη μέγιστη αντίσταση ενός υλικού πριν αυτό καταρρεύσει όταν υπόκειται σε δοκιμή εφελκυσμού. Καθώς η τάση ασκείται προοδευτικά στο σώμα, από ένα σημείο και μετά η τάση και η παραμόρφωση δε σχετίζονται πλέον με γραμμικό τρόπο. Όταν η τάση παύσει να ασκείται, το σώμα δεν επανέρχεται στις αρχικές του διαστάσεις αφού έχει επέλθει μόνιμη παραμόρφωση. Στην Εικόνα 1.1 παρουσιάζεται η καμπύλη τάσης παραμόρφωσης ενός τυχαίου μετάλλου. Η ελαστική περιοχή εκτείνεται από την αρχή της καμπύλης ως το όριο αναλογίας. Επειδή το ακριβές σημείο όπου παύει να υπάρχει αναλογία τάσης παραμόρφωσης είναι δύσκολο να υπολογιστεί χαράζεται μια παράλληλη ευθεία στο πρώτο τμήμα της καμπύλης το οποίο όμως απέχει κατά 0,2% της παραμόρφωσης προς τα δεξιά. Το σημείο στο οποίο αυτή η ευθεία τέμνει την αρχική καμπύλη καλείται Τάση Διαρροής. Το αναλογικό όριο δεν χρησιμοποιείται σχεδόν ποτέ για τον καθορισμό της τάσης διαρροής. Όσο η τάση αυξάνεται, η κλίση της ευθείας εξαρτάται από την πλαστική συμπεριφορά του εξεταζόμενου μετάλλου. Για τα περισσότερα μέταλλα η τάση για να διατηρηθεί η πλαστική ροή αυξάνεται λόγω της ενδοτράχυνσης. Συνεπώς η τάση πρέπει να αυξηθεί και η καμπύλη ανυψώνεται ως ένα μέγιστο σημείο που καλείται όριο αντοχής εφελκυσμού.

---

[3] <sup>2</sup> Γ. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, “Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών”, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2008, Β Έκδοση

[4] Χρυσουλάκης. (2007). Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

[5] [https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BSMM213/TMII\\_%CE%9C%CE%AC%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1\\_2.pdf](https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BSMM213/TMII_%CE%9C%CE%AC%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1_2.pdf)



Εικόνα 1.1: Τυπική καμπύλη Τάσης – Παραμόρφωσης [5]

### Όριο Διαρροής (Yield Strength) YS

Αντιστοιχεί στην τάση όπου η πλαστική παραμόρφωση έχει αναπτυχθεί πλήρως σε μια διατομή του σώματος. Κάποιοι τύποι μετάλλων όπως οι ανοπτημένοι χάλυβες παρουσιάζουν μια απότομη μετάβαση από την ελαστική στην πλαστική περιοχή. Αυτά τα υλικά δίνουν με ακρίβεια ένα σημείο yield που είναι εύκολο να παρατηρηθεί. Σε άλλες περιπτώσεις η μετάβαση είναι σταδιακή και το σημείο προσδιορίζεται γραφικά με τον τρόπο που προσδιορίστηκε παραπάνω. Τέλος στα ψαθυρά υλικά, η διαρροή δε λαμβάνει χώρα επί της ουσίας. Για τα υλικά αυτά υπάρχουν λίστες με τιμές τάσης που αντιστοιχούν σε παραμορφώσεις που έχουν καθοριστεί αυθαίρετα. Αυτό συμβαίνει επειδή επί της ουσίας δεν υπάρχει γραμμικό τμήμα στην καμπύλη και η αστοχία επέρχεται σε πολύ μικρές τιμές παραμόρφωσης. (Philip A. Schweitzer, 2003)

### Σκληρότητα

Ως σκληρότητα ενός υλικού μπορεί να ορισθεί η αντίσταση που αυτό προβάλλει έναντι στην κάθετη διείσδυση ενός άλλος υλικού μεγαλύτερης σκληρότητας. Η σκληρότητα μπορεί να μετρηθεί με πολύ εύκολο και γρήγορο τρόπο. Οι δοκιμές σκληρότητας είναι ιδιαίτερα χρήσιμες μιας και σχετίζονται με την αντοχή του υλικού. Για τη μέτρηση της σκληρότητας έχει αναπτυχθεί μια σειρά μεθόδων όπως η Brinell, Vickers και Rockwell. Στη μέθοδο Brinell ο διεισδυτής είναι σφαίρα από σκληρό χάλυβα ή καρβίδιο με διάμετρο [D] 5 ή 10 mm. Η σφαίρα τοποθετείται πάνω στη λειασμένη επιφάνεια και ασκείται φορτίο [F] για χρονικό διάστημα 15 sec. Η διείσδυση της σφαίρα δημιουργεί κοιλότητα διαμέτρου [d]. Η σκληρότητα δίνεται από τον παρακάτω τύπο :

$$BHN = \frac{2F}{\pi D [D - (D^2 - d^2)^{1/2}]}$$

## 1.2 Μεταλλικά κράματα<sup>3</sup>

Κράμα καλείται κάθε μείγμα δύο ή περισσότερων στοιχείων (Α,Β,..., κ.λπ.) από τα οποία το ένα τουλάχιστον είναι μέταλλο. Τα κράματα μετάλλων δημιουργούνται προκειμένου να συνδυαστούν ιδιότητες των βασικών συστατικών σε ένα νέο υλικό. Έτσι, για παράδειγμα, ο χάλυβας (κράμα σιδήρου με άνθρακα) είναι πιο σκληρός και ανθεκτικός από τον σίδηρο, ένα από τα βασικά συστατικά του.

Βασικός λόγος, λοιπόν, παραγωγής κραμάτων είναι η βελτίωση σκληρότητας, αντοχής, βάρους, αντίστασης στη διάβρωση κ.λπ. των καθαρών (πρωτογενών) μετάλλων. Ένα χαρακτηριστικό των κραμάτων, σε αντίθεση με τα πρωτογενή μέταλλα, είναι ότι δεν έχουν καθορισμένο σημείο τήξης, συγκεκριμένη θερμοκρασία δηλαδή, στην οποία λιώνουν. Σε αυτά υπάρχει ένα εύρος θερμοκρασιών, μέσα στο οποίο τα κράματα βρίσκονται μεταξύ στερεάς και υγρής κατάστασης. Συνηθισμένες εφαρμογές κραμάτων απαντούν στα πολύτιμα μέταλλα, στις κατασκευές, στις οικοδομές, κ.λπ.

Ένα άλλο βασικό χαρακτηριστικό του κράματος είναι ότι τα συστατικά του στοιχεία συμμετέχουν στη δημιουργία μίας κοινής κρυσταλλικής δομής, ή οποία προκαλείται συνήθως με σύντηξη των στοιχείων του κράματος και ακόλουθη στερεοποίηση (πήξη). Η οπτική εμφάνιση ενός μετάλλου ή κράματος με τη βοήθεια μικροσκοπίου (π.χ. μεταλλογραφικού ή ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης), μετά από κατάλληλη προετοιμασία, είναι γνωστή με τον όρο μικροδομή.

### Μικροδομή κραμάτων

Συστατικά στοιχεία της μικροδομής είναι οι φάσεις και οι κόκκοι. **Κόκκος** ή κρυσταλλίτης ή απλώς κρύσταλλος είναι η δομική μονάδα των μεταλλικών υλικών και αποτελεί κάθε περιοχή του υλικού, που έχει προκύψει από την επανάληψη του στοιχειώδους κυττάρου στο χώρο, με τον ίδιο προσανατολισμό. Οι δομή κόκκων είναι η συνηθέστερα συναντώμενη δομή, στην περίπτωση μετάλλων και κραμάτων.

**Φάση** είναι μια ομογενής περιοχή υλικού. Ομογενής σημαίνει ότι έχει παντού την ίδια χημική σύσταση, την ίδια κρυσταλλική δομή και τις ίδιες ιδιότητες. Στην παρατήρηση ενός κράματος με οπτικό μικροσκόπιο, οι υπάρχουσες φάσεις ξεχωρίζουν μεταξύ τους λόγω της διαφορετικής τονικότητας (contrast) που τις χαρακτηρίζει.

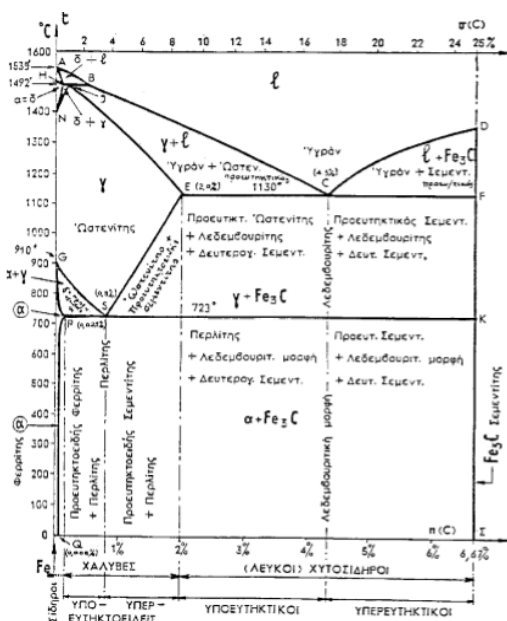
---

[3] <sup>3</sup> Γ. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, “Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών”, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2008, Β Έκδοση

[4] Χρυσουλάκης. (2007). Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών. Αθήνα: Παπασωτηρίου.

### 1.3 Οι χάλυβες κατασκευών<sup>4</sup>

Οι χάλυβες, όπως είναι γνωστό, είναι κράματα Fe-C. Περιέχουν πάντα και άλλες προσμίξεις σε μικρές ποσότητες, είτε ως συστατικά βελτίωσης των ιδιοτήτων τους, είτε εξ'αίτίας της παραγωγικής διαδικασίας (αποξειδωτικά), είτε ακαθαρσίες. Στις κατασκευές (οπλισμός σκυροδέματος, μεταλλικά κτίρια, ναυπηγική κ.λπ.), χρησιμοποιούνται χάλυβες που έχουν μικρή περιεκτικότητα σε C (λιγότερο από 0,2% συνήθως), ώστε να έχουν ικανοποιητική δυσθραυστότητα και να είναι συγκολλησιμοι. Σε χάλυβες με μεγαλύτερη περιεκτικότητα σε C είναι πολύ πιθανό να σχηματιστεί μαρτενσίτης κατά τη συγκόλλησή τους, μικρογραφικό στοιχείο που είναι ανεπιθύμητο στις κατασκευές λόγω της ευθραυστότητάς του. Οι χάλυβες περιγράφονται από το μετασταθές διάγραμμα σιδήρου σεμεντίτη, με το οποίο καθίστανται γνωστά τα μικρογραφικά στοιχεία τους σε σχέση με την περιεκτικότητά τους σε C που έχουν, αλλά και τη θερμοκρασία ωστενιτοποίησής τους.



Εικόνα 1.2: Μετασταθές διάγραμμα σιδήρου – άνθρακα [6]

#### Κύρια κραματικά στοιχεία χαλύβων

Όπως προαναφέρθηκε, τα κραματικά στοιχεία προστίθενται στους χάλυβες με σκοπό να ρυθμιστούν οι ιδιότητες του χάλυβα, αλλά επίσης πολλές φορές βρίσκονται μέσα στους χάλυβες ως ακαθαρσίες. Τα στοιχεία αυτά, ανάλογα με το αν επεκτείνουν και σταθεροποιούν τη φάση του ωστενίτη (γ) ή του φερρίτη (α), χαρακτηρίζονται ως γ-φερρογόνα και α-φερρογόνα. Και στις δύο περιπτώσεις η παρουσία αυτών των στοιχείων μεταθέτει τις θερμοκρασίες και τις περιεκτικότητες των μετασχηματισμών του διαγράμματος ισορροπίας σιδήρου-σεμεντίτη Fe-Fe<sub>3</sub>C. Παρακάτω παρατίθενται επιγραμματικά τα διάφορα

[6] <sup>4</sup> <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/FeC.pdf>

[7] <https://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/6%20SIDHROUXA%20KRAMATAw.pdf>

κραματικά στοιχεία και οι ακαθαρσίες που συναντώνται στα διάφορα κράματα και ταξινομούνται αναλόγως.

#### **Τα α-φερρογόνα στοιχεία**

- Αργίλιο (Αλουμίνιο) (Al) :
- Πυρίτιο (Si)
- Χρώμιο (Cr)
- Μολυβδαίνιο (Mo)
- Βανάδιο (V)

#### **Τα γ-φερρογόνα στοιχεία**

- Μαγγάνιο (Mn)
- Νικέλιο (Ni)
- Χαλκός (Cu)

#### **Ακαθαρσίες**

- Φωσφόρος (P)
- Θείο (S)

## 1.4 Χάλυβας

Χάλυβας ονομάζεται το κράμα σιδήρου με άνθρακα σε αναλογία μικρότερη από 2% κατά βάρος και λιγότερο από 1%κ.β. Μαγγάνιο. Ο άνθρακας επιδρά στην αύξηση της αντοχής και σκληρότητας του κράματος. Με διαφορετικές αναλογίες και θερμικές κατεργασίες κατά τη μορφοποίηση είναι δυνατό να παραχθεί μια σειρά από χάλυβες με ιδιότητες που ποικίλουν. Λόγω του χαμηλού κόστους, της υψηλής αντοχής και της αφθονίας του ο χάλυβας είναι το κύριο μεταλλικό κατασκευαστικό στοιχείο για το σύνολο σχεδόν της βιομηχανίας. Όσον αφορά στη ναυπήγηση μεγάλων εμπορικών πλοίων ο χάλυβας κυριαρχεί συντριπτικά έναντι των άλλων υλικών σχεδόν στο σύνολο των κατασκευών.

## 1.5 Ναυπηγικοί χάλυβες<sup>5</sup>

Οι χάλυβες για την κατασκευή πλοίων παράγονται κυρίως με μία από τις τρεις μεθόδους:

- Ανοιχτής φλογοκαμίνου
- Ηλεκτρικής καμίνου
- Βασικού οξυγόνου

Σύμφωνα με το πρότυπο A131M της ASTM οι χάλυβες για την κατασκευή πλοίων χωρίζονται σε δύο κατηγορίες:

Κοινούς χάλυβες – Με τις κωδικές ονομασίες A, B, D, DS, και E και ελάχιστο όριο διαρροής 235 MPa.

Ενισχυμένους χάλυβες ή χάλυβες υψηλής αντοχής – Με τις κωδικές ονομασίες AH, DH, και EH και ελάχιστο όριο διαρροής 315 ή 350 MPa. Στον Πίνακα 1.3 δίδεται η χημική σύσταση των κοινών ναυπηγικών χαλύβων σύμφωνα με το ίδιο πρότυπο.

ΚΟΙΝΟΙ ΝΑΥΠΗΓΙΚΟΙ ΧΑΛΥΒΕΣ ΚΑΤΑ ASTM A131							
Χάλυβας	C <sub>max</sub>	Mn	P <sub>max</sub>	S <sub>max</sub>	Si	Al <sup>1</sup>	Nb
A	0,21	<sup>2</sup>	0,035	0,035	0,50 max	-	-
B	0,21	0,80 min	0,035	0,035	0,35 max	-	-
D	0,21	0,60 min	0,035	0,035	0,10-0,35	0,020 min <sup>4</sup>	-
E	0,18	0,70 min	0,035	0,035	0,10-0,35	0,020 min	-

Πίνακας 1.3: Χημική σύσταση κοινών ναυπηγικών χαλύβων. [15]

Υποσημειώσεις:

1. Συνολικό αλουμίνιο
2. Μαγγάνιο όχι λιγότερο από 2,5 φορές την % κ.β περιεκτικότητα σε C
3. Το άθροισμα των περιεκτικότητων C + 1/6 Mn δεν θα πρέπει να υπερβαίνει σε καμία περίπτωση την τιμή 0,40%.
4. Το Al είναι απαραίτητο σε περιπτώσεις που το πάχος των ελασμάτων είναι μεγαλύτερο των 25 mm.

[8] <sup>5</sup> Β.Ι. Παπάζογλου, “Ναυπηγική Τεχνολογία”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1995

[9] Παντελής. (2006). Διαβρωση Και Προστασία Ναυπηγικών Κατασκευών. Αθήνα: ΕΜΠ.



Η χημική σύσταση των χαλύβων υψηλής αντοχής δίδεται στον Πίνακα 1.4:

ΧΑΛΥΒΑΣ	AH32, DH32, EH32 <u>AH36</u> , DH36, EH36 AH40, DH40, EH40
Χημική Σύσταση % κ.β	
C <sub>max</sub>	0,18
Mn	0,90 – 1,60 <sup>(1)</sup>
Si <sub>max</sub>	0,50
P <sub>max</sub>	0,035
S <sub>max</sub>	0,035
Al <sub>(2)</sub>	0,015
Nb <sub>(2)</sub>	0,02 – 0,05
V <sub>(2)</sub>	0,05 – 0,10
Ti <sub>max</sub> <sup>(2)</sup>	0,02
Cu <sub>max</sub>	0,35
Cr <sub>max</sub>	0,20
Ni <sub>max</sub>	0,40
Mo <sub>max</sub>	0,08

Πίνακας 1.4: Χημική σύσταση χαλύβων υψηλής αντοχής. [15]

Για μικρά πάχη έως 12 mm οι χάλυβες είναι συνήθως μερικώς αποξειδωμένοι (semi killed), ενώ για μεγαλύτερα πάχη είναι πλήρως αποξειδωμένοι (killed).

Η συγκολλησιμότητα των ναυπηγικών χαλύβων είναι πολύ καλή για όλες τις διαθέσιμες τεχνικές συγκόλλησης, πρέπει όμως σε κάθε περίπτωση το άθροισμα των % περιεκτικότητας κ.β. σε C και Mn διαιρεμένο με το 6 να μην υπερβαίνει την τιμή 0,40%:

$$\frac{\%C + \% Mn}{6} \leq 0.4$$

### Μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων

Τα τελευταία χρόνια παρατηρείται μία τάση προτίμησης των χαλύβων υψηλής αντοχής έναντι των κοινών, στη ναυπηγική, λόγω των πολύ καλών μηχανικών ιδιοτήτων που έχουν οι πρώτοι, με αποτέλεσμα να χρειάζονται μικρότερες διατομές στα δομικά στοιχεία του πλοίου. Έτσι μειώνεται το βάρος της κατασκευής, οπότε μπορεί να είναι πιο γρήγορο και ευέλικτο ένα πλοίο. Οι μηχανικές ιδιότητες των ναυπηγικών χαλύβων (σύμφωνα με το πρότυπο A131M της ASTM) φαίνονται στον Πίνακα 1.5.

ΜΗΧΑΝΙΚΕΣ ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΝΑΥΠΗΓΙΚΩΝ ΧΑΛΥΒΩΝ						
Χάλυβας	Όριο διαρροής σε MPa	Όριο Θραύσης σε MPa	% Επιμήκυνση	Δυσθραυστότητα (J) για t ≤ 50 mm		
				θ °C	διαμήκης	εγκάρσια
A- B- D- E	>235	400-520	22%	+20		
				0	27	20
				-20	27	20
				-40	27	20
AH32- DH32 EH32	315-350	440-590	22%	0	31	22
				-20	31	22
				-40	31	22
AH36 DH36 EH36	>350	490-620	21%	0	34	24
				-20	34	24
				-40	34	24
AH40 DH40 EH40	>390	510-660	20%	0	41	27
				-20	41	27
				-40	41	27

Πίνακας 1.5: Μηχανικές ιδιότητες ναυπηγικών χαλύβων. [15]

Από τον παραπάνω πίνακα γίνεται εύκολα αντιληπτό, ότι οι επί μέρους χάλυβες στις 4 ομάδες χαλύβων που περιγράφονται, διαφέρουν στις μηχανικές ιδιότητες τους μονάχα στη θερμοκρασία μέτρησης της δυσθραυστότητας. Αυτό γιατί αλλάζει η θερμοκρασία μετάβασης από την όλκιμη στη ψαθυρή θραύση με τα αντίστοιχα αποτελέσματα.

## 1.6 Ιστορική εξέλιξη και χρήση χαλύβων στη Ναυπηγική<sup>6</sup>

Από την αρχή του 20ου αιώνα, οπότε ο σίδηρος αντικαταστάθηκε τελείως από το χάλυβα, ο τελευταίος παραμένει το σημαντικότερο ναυπηγικό υλικό για την ανέγερση της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου. Κατά τη διάρκεια των πρώτων δεκαετιών χρήσης του χάλυβα ως Ναυπηγικού υλικού το σημαντικότερο κριτήριο για την επιλογή του ήταν η αντοχή, όπως αυτή ορίζεται από το όριο διαρροής ή την τάση θραύσης. Η σημασία της ιδιότητας της δυσθραυστότητας και της αντίστασης στη διάδοση προϋπαρχουσών ρωγμών έγινε αντιληπτή για πρώτη φορά όταν επεκτάθηκε η αρχή της ανέγερσης πλοίων εξ' ολοκλήρου με συγκόλληση, κάτι που συνέβη κατά τη διάρκεια του Β' Παγκοσμίου Πολέμου.

Συγκεκριμένα, στη δεκαετία 1942-52 αναφέρθηκαν τουλάχιστον 200 περιπτώσεις πλοίων που υπέστησαν σημαντικές θραύσεις. Από το σύνολο αυτό, τουλάχιστον εννέα πετρελαιοφόρα τύπου T-2 και επτά πλοία τύπου Liberty κόπηκαν στα δύο. Αν και οι περισσότερες από τις αστοχίες αυτές προκλήθηκαν από λάθη στη σχεδίαση λεπτομερειών ή από λανθασμένες πρακτικές συγκόλλησης, αυτό αποτέλεσε την αφορμή για την ανάπτυξη νέων τύπων χαλύβων άνθρακα-μαγγανίου με βελτιωμένη αντοχή σε ψαθυρή θραύση. Σημαντική ώθηση στην ανάπτυξη νέων χαλύβων υψηλής αντοχής και καλής δυσθραυστότητας προέκυψε από την ανάγκη κατασκευής υποβρυχίων που να λειτουργούν σε ολοένα μεγαλύτερα βάθη. Στη δεκαετία του 1940 και στις αρχές της δεκαετίας του 1950

[12]<sup>6</sup> <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=287>

τα υποβρύχια κατασκευάζονταν από χάλυβες υψηλής τάσης θραύσης (high-tensile strength, HTS steel), με όριο διαρροής 350 MPa σε αντικατάσταση του μαλακού χάλυβα που χρησιμοποιείτο μέχρι τότε και που είχε όριο διαρροής περίπου 225 MPa. Από το τέλος της δεκαετίας του 1950 κυριαρχεί η χρήση του χάλυβα HY-80 με όριο διαρροής 560 MPa. Περαιτέρω εξελίξεις του χάλυβα αυτού υψηλής αντοχής περιλαμβάνουν τους τύπους HY100 και HY-130 με όρια διαρροής 690 MPa και 900 MPa αντίστοιχα. Όλοι οι χάλυβες της σειράς HY έχουν αποκτήσει τις ιδιότητές τους από σειρά μεταλλουργικών διαδικασιών οι οποίες απαιτούν πολύ αυστηρές προδιαγραφές και ελέγχους για τη συγκόλλησή τους, έτσι ώστε να αποφεύγεται η δημιουργία ρωγμών.

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1960 και των αρχών της δεκαετίας του 1970 σημειώθηκαν σημαντικές εξελίξεις στην τεχνολογία βελτίωσης μιας άλλης ομάδας χαλύβων, των φερριτικών. Την ώθηση προς την κατεύθυνση αυτή έδωσαν η βιομηχανία κατασκευής θαλάσσιων εξεδρών εξόρυξης πετρελαίου (offshore industry) που αναζητούσε χάλυβες υψηλής αντοχής και δυσθραυστότητας, που να μπορούν ωστόσο να συγκολλούνται εύκολα, καθώς και οι νέες δυνατότητες των χαλυβουργείων να παράγουν “καθαρούς” χάλυβες, χωρίς δηλαδή ανεπιθύμητες προσμίξεις. Οι φερριτικοί χάλυβες είχαν και έχουν χρήση ως το πιο κοινό υλικό για μεταλλικές κατασκευές ξηράς, λόγω του μικρού κόστους τους και της εξαιρετικής συγκολλησιμότητάς τους. Σήμερα είναι δυνατή η παραγωγή τέτοιων χαλύβων με χαρακτηριστικά αντοχής και δυσθραυστότητας ίδια ή καλύτερα εκείνων του χάλυβα HY-80. Αυτό οφείλεται στο συνδυασμό “καθαρών” μεθόδων παρασκευής, ακριβούς προσθήκης μικρών ποσοτήτων βελτιωτικών στοιχείων και κατάλληλων θερμικών κατεργασιών, με αποτέλεσμα τη δημιουργία φερριτικής μικροδομής που οδηγεί σε πολύ καλύτερη συγκολλησιμότητα. Αυτή η ομάδα χαλύβων έχει ονομαστεί “μικρο-κραματωμένοι χάλυβες υψηλής αντοχής” (high strength low alloy, HSLA steels), και θεωρείται ένα από τα πολλά υποσχόμενα υλικά για Ναυπηγικές εφαρμογές.

## 1.7 Σύγκριση χαλύβων AH32 – AH36 <sup>7</sup>

Οι χάλυβες υψηλής αντοχής υφίστανται μεγαλύτερες τάσεις (λόγω του μειωμένου πάχους), συνεπώς η απόξεση των προστατευτικών επικαλύψεων γίνεται πιο γρήγορα, άρα αυξάνεται η πιθανότητα έναρξης ρωγμής και συνεπώς ο κίνδυνος διάβρωσης με μηχανική καταπόνηση. Τέλος, λόγω του μειωμένου πάχους κατά τη χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής, μειώνεται και το περιθώριο διάβρωσης (περιθώριο διάβρωσης, corrosion margin: είναι το πάχος του χάλυβα που μπορεί να θυσιάσει χωρίς τη δημιουργία προβλημάτων αντοχής στην κατασκευή).

Το γεγονός αυτό φαίνεται στην παρακάτω Εικόνα 1.6 όπου γίνεται μια σύγκριση του περιθωρίου διάβρωσης στην περίπτωση χρήσης του χάλυβα υψηλής αντοχής AH32 και του AH36 στα διάφορα μέρη της κατασκευής ενός πλοίου. Είναι προφανές ότι η διαφορά αυτή είναι ακόμα μεγαλύτερη στην περίπτωση χρήσης κοινού χάλυβα. Όπως φαίνεται στον πίνακα το αρχικό πάχος στην περίπτωση χρήσης του AH36 είναι μικρότερο σε όλες τις περιπτώσεις

---

[13]<sup>7</sup>[https://www.leonghuat.com/plates/comparison\\_grades\\_for\\_shipbuildi.htm](https://www.leonghuat.com/plates/comparison_grades_for_shipbuildi.htm)

[14]<http://www.ysteelplate.com/LR-Grade-AH32-AH36.html>

[15]<https://gangsteel.com/abs-grade-ah32-ab-ah32-steel-plate-supplier/>

λόγω της αυξημένης αντοχής, ωστόσο το ελάχιστο επιτρεπόμενο πάχος δεν είναι ανάλογα μικρότερο, σε κάποιες περιπτώσεις δε, είναι το ίδιο με αυτό στην περίπτωση του AH32. Επομένως, με χρήση του χάλυβα AH32 υπάρχει 0.5-1 mm μεγαλύτερο περιθώριο απώλειας υλικού.

Panel description	AH32		AH36	
	t <sub>initial</sub>	t <sub>min</sub>	t <sub>initial</sub>	t <sub>min</sub>
Bottom	19.0	15.0	18.5	15.0
Side, general	21.0	17.0	19.0	16.0
Side upper	17.5	14.0	17.5	14.0
Deck	19.0	15.5	17.0	15.5
Inner side, mid height	16.5	13.5	15.0	12.5
Inner side, upper	20.0	16.0	20.0	16.0
Inner bottom	20.0	16.0	19.0	15.5
LBHD, lower strake	21.5	17.5	19.0	15.5
LBHD, mid height	15.5	12.5	14.0	12.5
LBHD upper strake	18.0	14.5	17.5	14.0
Stringers in double side	12.5	10.5		
Transv. frame, bottom	19.0	15.5		
Transv. Frame, deck, COT	12.0	9.5		
Transv. Bhd, BWT	20.0	16.0		
Transv. Bhd, COT, mid height	14.0	11.0		
Stringers in double side	12.5	10.0		

Εικόνα 1.6: Σύγκριση χάλυβα AH32 και AH36 ως προς το περιθώριο διάβρωσης. [15]

Στη συνέχεια θα παραθέσουμε μερικά βασικά στοιχεία και εφαρμογές του ναυπηγικού χάλυβα AH36, ο τρίτος τη τάξει χάλυβας του πίνακα 1.5, ο οποίος είναι και ο χάλυβας που μελετάμε την αντοχή σε εφελκυσμό κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες διάβρωσης (χρήση αλατονέφωσης).

## 1.8 Ο ναυπηγικός χάλυβας AH36<sup>8</sup>

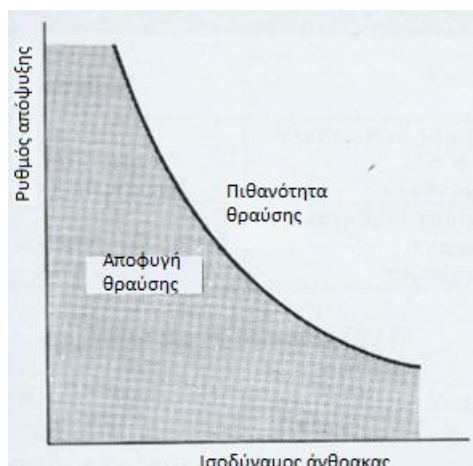
Η ονομασία και κατάταξή του ως ναυπηγικός χάλυβας τύπου AH36 είναι σύμφωνα με το πρότυπο A131M της ASTM και προέρχεται από τη Διεθνή Ομοσπονδία Ναυπηγικών (International Association of Classification Societies, IACS). Με αυτή την ονομασία είναι παγκόσμια γνωστός, όμως μπορεί να τον συναντήσει κανείς και με άλλη ονομασία, σύμφωνα με την κωδικοποίηση κάποιων χωρών (π.χ. K11852 στις Η.Π.Α, A36 στη Ρωσία, 1.0565 στη Γερμανία κ.λπ.). Η χημική σύσταση και οι μηχανικές του ιδιότητες περιγράφηκαν προηγουμένως στους Πίνακες 1.4 – 1.5.

Η σκληρότητα του AH36 είναι της τάξης των 180 Vickers. Η τιμή του ισοδύναμου άνθρακα  $C_{eq}$  για τον AH36 ποικίλει από 0,38 – 0,57, αφού υπάρχει πολύ μεγάλη διακύμανση στην περιεκτικότητα του Mn. Συνήθως η τιμή του  $C_{eq}$  για τον AH36 του εμπορίου δεν ξεπερνάει το 0,40. Για τιμή του  $C_{eq}$  ίση με 0,38 υπάρχει εξαιρετικά χαμηλή πιθανότητα ρωγμάτων στη

[14]<sup>8</sup> <http://www.ysteelplate.com/LR-Grade-AH32-AH36.html>

[15] <https://gangsteel.com/abs-grade-ah32-ab-ah32-steel-plate-supplier/>

Θ.Ε.Ζ., ακόμα και με σχετικά υψηλούς ρυθμούς απόψυξης. Αντίθετα, τιμές του  $C_{eq}$  άνω του 0,48 δείχνουν υψηλές πιθανότητες ρωγμάτωσης, ακόμα και με χαμηλούς ρυθμούς απόψυξης (Σχήμα 1.7).



Σχήμα 1.7: Σχέση μεταξύ  $C_{eq}$  και ρυθμού απόψυξης. [16]

### Χρήση χάλυβα AH36

Η γάστρα του πλοίου και οι δεξαμενές κατασκευάζονται συνήθως από κοινό ναυπηγικό χάλυβα. Ωστόσο τα τελευταία χρόνια διευρύνεται η χρήση χαλύβων υψηλής αντοχής, με αποτέλεσμα μικρότερου πάχους ελάσματα και χαμηλότερο βάρος, σε σχέση με τους ανθρακούχους χάλυβες.

Στην παρούσα διπλωματική εργασία μελετήθηκε ο χάλυβας AH36, που ανήκει στους χάλυβες υψηλής αντοχής.

Σε σχέση με τον κοινό μαλακό χάλυβα (mild steel) ο χάλυβας υψηλής αντοχής AH36 έχει:

- Χαμηλότερη περιεκτικότητα σε άνθρακα
- Μεγαλύτερη σκληρότητα
- Υψηλότερη αντοχή
- Εμφανίζει την ίδια αντοχή σε κόπωση
- Εξίσου καλή συγκολλησιμότητα, ενώ
- Η αντοχή του σε διάβρωση είναι παρόμοια

Ο χάλυβας αυτός χρησιμοποιείται στην πλειονότητα των φορτηγών πλοίων μεταφοράς μεταλλεύματος (χύδην) λόγω των ιδιαίτερα ικανοποιητικών μηχανικών ιδιοτήτων, όπως είδαμε καθώς και λόγω του σχετικά χαμηλού κόστους αναλογικά με τις δυνατότητες που παρέχει. Για το λόγο αυτό κρίθηκε σκόπιμη η κοπή μιας αρχικής λαμαρίνας διαστάσεων 1000 x 250 \* 6.5 [mm] ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε 51 δοκίμια διαστάσεων 220 x 15 x 6.5 [mm] ώστε ορισμένα από αυτά να μελετηθούν ως προς τις μηχανικές τους ιδιότητες σε δοκιμή εφελκυσμού (blank δοκίμια) ενώ τα υπόλοιπα υποβλήθηκαν αρχικά σε συνθήκες διάβρωσης μέσω επίδρασης αλατονέφωσης και στη συνέχεια μελετήθηκαν μηχανικά κατά τον ίδιο τρόπο. Η διαδικασία αυτή θα μελετηθεί αναλυτικότερα σε επόμενο κεφάλαιο.

## 2 Κατεργασίες

Για τη μορφοποίηση και πρόσδοση επιθυμητών ιδιοτήτων στα μεταλλικά υλικά έχουν αναπτυχθεί με την πάροδο των χρόνων πληθώρα μεθόδων. Για τη σωστή επιλογή της επιθυμητής κατεργασίας στα πλαίσια της βιομηχανίας σημαντικό ρόλο παίζουν το κόστος της κατασκευής, ο σκοπός λειτουργίας και ο αριθμός των τεμαχίων, οι καταπονήσεις που υφίσταται το τεμάχιο καθώς και η επιθυμητή ακρίβεια της κατασκευής. Συμπληρωματικά, ο αριθμός των τεμαχίων ή ομοιωμάτων παίζει εξίσου σημαντικό ρόλο στο κόστος της επιθυμητής κατεργασίας. Για το λόγο αυτό, όταν το ζητούμενο είναι η πειραματική διερεύνηση ενός φαινομένου που παρουσιάζεται στη βιομηχανία τότε η πειραματική διαδικασία οφείλει να ακολουθεί αν όχι τις ίδιες κατεργασίες, κάποιες που να μην οδηγούν σε απόκλιση συνθηκών σε σχέση με τις πραγματικές. Στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας έγινε σε πρώτη φάση εφαρμογή μιας συγκεκριμένης μορφής κατεργασίας, η οποία είναι γνωστή με τον όρο υδροκοπή ή υδροβολή. Κάποιες βασικές αρχές της συγκεκριμένης κατεργασίας καθώς και κάποια τεχνικά χαρακτηριστικά (μηχανισμός κοπής, κοπτικό εργαλείο κλπ) παρατίθενται παρακάτω. Στη συνέχεια παραθέτουμε κάποια βασικές αρχές της κατεργασίας της ψηγματοβολής με χρήση υαλοσφαιριδίων, η οποία εφαρμόστηκε με σκοπό την απομάκρυνση των επιφανειακών ακαθαρσιών του ναυπηγικού χάλυβα καθώς και των χρωματικών επιστρώσεων με σκοπό στη συνέχεια να τοποθετηθούν τα «καθαρά» δοκίμια σε θάλαμο αλατονέφωσης και σε λουτρό εμβάπτισης NaCl και να διαβρωθούν σε συνθήκες θαλάσσιου περιβάλλοντος.

### 2.1 Υδροκοπή<sup>9</sup>

Η υδροκοπή είναι η τεχνολογία κοπής που έρχεται από το μέλλον. Συγκαταλέγεται στις μη συμβατικές κατεργασίες υψηλής ακρίβειας. Εύκολα ξεχωρίζει από τις άλλες μεθόδους κοπής, λόγω της μεγάλης ευρύτητας εφαρμογών και του οικολογικού, 100% μη ρυπογόνου, τρόπου λειτουργίας. Η κοπή επιτυγχάνεται μέσω μιας δέσμης νερού μικρής διαμέτρου (0,5-1,2 χιλιοστά) και υπέρ-υψηλής πίεσης (4.000 ατμόσφαιρες) και υπό γωνία, με ή χωρίς την προσθήκη λειαντικού ανάλογα με το υλικό. Το στόμιο της μηχανής που επιτυγχάνει την υδροκοπή συνήθως κατασκευάζεται από τεχνητό πολύτιμο λίθο και έχει άνοιγμα  $0.05'' \div 0.020''$ . Στην εικόνα 2.1 παρουσιάζεται μια τυπική διάταξη υδροκοπής.



Εικόνα 2.1: Τυπική σχεδίαση ενός καθαρού ακροφυσίου εκτόξευσης νερού. [18]

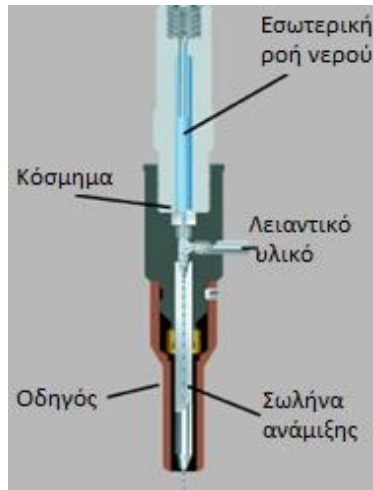
[17]<sup>9</sup> Μανωλάκος, Δ., 2018. Jet Machining [WWW Document]. mycourses.ntua.gr.

[18]<http://blog.novaglass.gr/2014/08/blog-post.html>

[19][http://dml.chania.teicrete.gr/WJM/WJM\\_en.html](http://dml.chania.teicrete.gr/WJM/WJM_en.html)

[20][https://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_jet\\_cutter](https://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter)

Μία abrasive jet ξεκινά το ίδιο όπως ένα καθαρό water jet. Καθώς το λεπτό ρεύμα του νερού εγκαταλείπει το λειαντικό υλικό (κόσμημα) προστίθεται στη ροή του νερού και αναμιγνύεται. Το νερό υψηλής ταχύτητας που εξέρχεται από το κόσμημα δημιουργεί ένα κενό το οποίο τραβά λειαντικό υλικό, το οποίο στη συνέχεια αναμιγνύεται με το νερό στο σωλήνα ανάμιξης. Η δέσμη του νερού επιταχύνει λειαντικά σωματίδια σε ταχύτητα αρκετά υψηλή ώστε να κοπούν σκληρά υλικά.



Εικόνα 2.2: Water jet με χρήση λειαντικών σωματιδίων. [18]

Η δύναμη του ύδατος μαζί με το λειαντικό διαβρώνει το υλικό. Η δράση κοπής ενισχύεται σημαντικά εάν το ρεύμα κινείται εγκάρσιως του υλικού και με την ιδανική ταχύτητα της κίνησης, η οποία εξαρτάται από μια ποικιλία παραγόντων συμπεριλαμβανομένου του υλικού, το σχήμα του τμήματος, την πίεση του νερού και τον τύπο των λειαντικών.

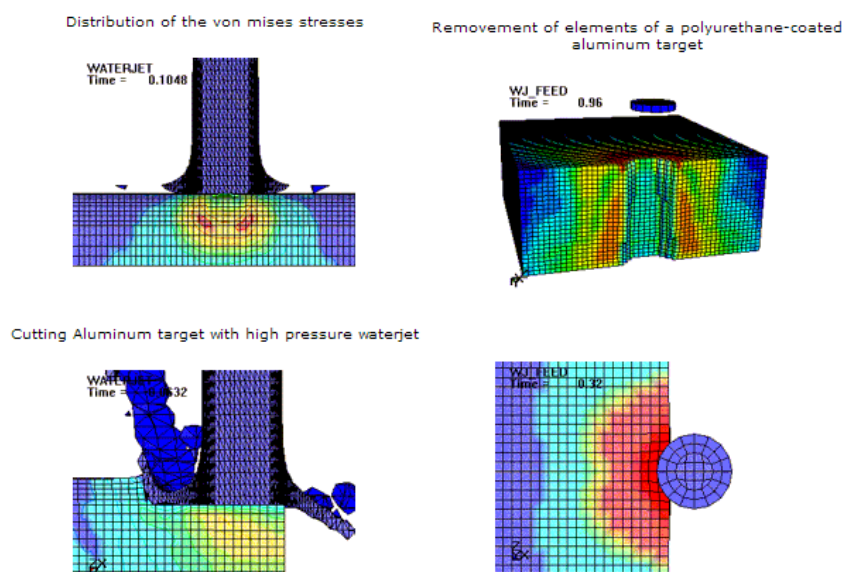


Εικόνα 2.3: (Αριστερά) Ένα τυπικό ακροφύσιο waterjet. [18]



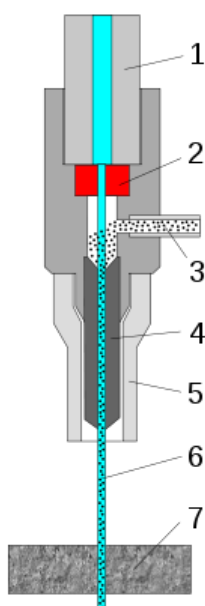
Εικόνα 2.4: (Δεξιά) Ένα λειαντικό ακροφύσιο εγκατεστημένο σε ένα μηχάνημα. Ο λευκός σωλήνας που προεξέχει μεταφέρει το λειαντικό. [18]





Εικόνα 2.5: Animation από το μέλος της ερευνητικής ομάδας των Χανίων- Κρήτη, κ. Phys. Μανιαδάκη Κυριακή. [19]

### Μέρη ενός waterjet



Εικόνα 2.6: Διάγραμμα ενός κόπτη πίδακα νερού [20]

# 1: Είσοδος υψηλής πίεσης νερού. # 2: Κόσμημα (ρουμπίνι ή διαμάντι). # 3: Λειαντικά (γρανάτη). # 4: Σωλήνας ανάμιξης. # 5: Οδηγικός κύλινδρος. # 6: Κοπή με εκτόξευση νερού. # 7: Κομμένο υλικό

### Πλεονεκτήματα υδροκοπής

Η δημοτικότητα της υδροκοπής έχει αυξηθεί ραγδαία από τα μέσα της δεκαετίας του 1990. Όπως θα δούμε στη συνέχεια υπάρχουν πολλοί λόγοι που δικαιολογούν αυτό το φαινόμενο. Μια εκτόξευση νερού είναι ένα ευπροσάρμοστο και ευέλικτο εργαλείο κατεργασίας. Μπορεί να κοπεί μια ευρεία ποικιλία υλικών αποτελεσματικά και μπορεί να δημιουργήσει επίσης μια ευρεία ποικιλία εξαρτημάτων.

- Κόβει σχεδόν κάθε υλικό
- Γρήγορη εγκατάσταση και προγραμματισμός

- Δεν παράγεται σχεδόν καθόλου θερμότητα
- Φιλικό προς το περιβάλλον

Ακόμη, συναντάμε και τα εξής **πλεονεκτήματα**:

- Ακρίβεια κοπής
- Μικρό πλάτος κοπής
- Χωρίς επιφανειακή σκλήρυνση
- Χωρίς καπνούς, αναθυμιάσεις και σκόνες
- Μπορεί να κατεργαστεί τα περισσότερα υλικά χωρίς προδιάτρηση οπής
- Δεν απαιτείται δευτερεύουσα επεξεργασία μετά την κύρια κατεργασία.

#### **Μειονεκτήματα**

- Κωνικότητα.

Κωνικότητα είναι όταν οι πίδακες χάλυβα εξέρχονται σε μία διαφορετική γωνία από αυτή που εισέρχεται και μπορεί να προκαλέσει ανακρίβεια των διαστάσεων.

- Χαμηλή ταχύτητα παραγωγής

Βασικό μειονέκτημα αυτής της μεθόδου είναι οι χαμηλές ταχύτητες κοπής σε σχέση με άλλες μεθόδους.

- Σε κοπή μεγάλου βάθους πιθανόν να υπάρξει μετακίνηση της δέσμης και σφάλματα.
- Οικονομικά αποδοτική για σχετικά μικρές ποσότητες παραγωγής

## 2.2 Ψηγματοβολή <sup>10</sup>

#### **Μέθοδοι προετοιμασίας της μεταλλικής επιφάνειας**

Η βάση της αποτελεσματικής προστασίας της επιφάνειας από τη διάβρωση είναι αρχικά η καλή προετοιμασία, δηλαδή ο καλός καθαρισμός της. Οι μέθοδοι της προετοιμασίας της επιφάνειας είναι οι ακόλουθες :

- Απολίπανση (degreasing).
- Απομάκρυνση της καλαμίνης (remove the mill scale).
- Μηχανικός καθαρισμός (mechanical cleaning).

[21]<sup>10</sup> file:///C:/Users/User/Downloads/APP\_GUIDE\_General\_Surface\_Prep\_Guide.pdf

[22]<https://www.standard.no/pagefiles/1167/m-501.pdf>

δ. Ψηγματοβολή (blast cleaning).

ε. Καθαρισμός με φλόγα (flame cleaning).

στ. Χημικός καθαρισμός-αποξείδωση (pickling).

ζ. Λείανση / Στίλβωση

Στη συνέχεια γίνεται πιο αναλυτική αναφορά στις μεθόδους της **ψηγματοβολής**, της **λείανσης/στίλβωσης** των μεταλλικών επιφανειών καθώς και της **δοκιμής εφελκυσμού** των δοκιμίων τα οποία θέλουμε να μελετήσουμε σχετικά με τις μηχανικές τους ιδιότητες και τις μεταβολές αυτών. Στο πειραματικό μέρος, γίνεται επίσης αναφορά στον καθαρισμό επιφανειών με χρήση υπερήχων (**ultrasonic**) μετά από κατεργασία λείανσης/στίλβωσης, για αυτό δεν θα αναφερθεί σε αυτή την ενότητα.

Με τη μέθοδο της ψηγματοβολής, πραγματοποιήθηκε το βασικό στάδιο προετοιμασίας των μεταλλικών επιφανειών των δοκιμίων που μελετήθηκαν σε διάβρωση. Με τη ψηγματοβολή, τα χαλύβδινα και αρχικώς βαμμένα δοκίμια που κόπηκαν με την κατεργασία της υδροκοπής καθαρίστηκαν από το αστάρι, δηλαδή τη μπογιά με την οποία ήταν βαμμένα. Έτσι εν τέλει διαμορφώθηκαν δυο βασικές κατηγορίες χαλύβδινων δοκιμίων, στα οποία μελετήθηκε η μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων σε συνθήκες θαλάσσιας διάβρωσης. Οι κατηγορίες αυτές είναι οι ακόλουθες:

- Δοκίμια χωρίς αστάρι (έχοντας υποβληθεί σε ψηγματοβολή)
- Δοκίμια με αστάρι (χωρίς να έχουν ψηγματοβοληθεί)

Στις παρακάτω εικόνες παρατίθενται οι ανωτέρω κατηγορίες δοκιμίων που επισημαίνονται:



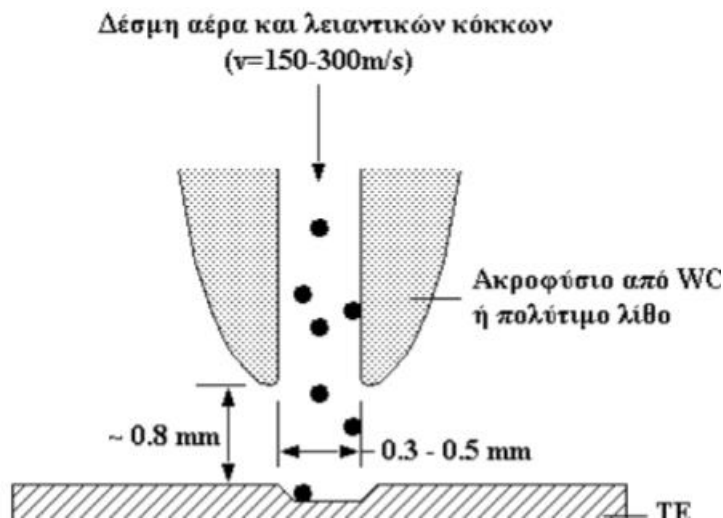
Εικόνα 2.7: Δοκίμιο με αστάρι



Εικόνα 2.8: Δοκίμιο χωρίς αστάρι

### Καθαρισμός με ψηγματοβολή

Πριν εφαρμοσθεί ο καθαρισμός με ψηγματοβολή, η επιφάνεια θα έπρεπε να έχει απολιπανθεί, να έχουν απομακρυνθεί η καλαμίνη και όλες οι τυχόν ακαθαρσίες, έτσι ώστε η επιφάνεια να έχει γίνει λεία. Μετά τον καθαρισμό με ψηγματοβολή η επιφάνεια ελευθερώνεται από την σκόνη και το πρώτο στρώμα βαφής επιχρίεται όσο το δυνατό πιο γρήγορα. Ο καθαρισμός με ψηγματοβολή βασίζεται στην μηχανική δράση των προσπιπτόντων (αεριοθούμενων), προς την καθοριζόμενη χαλύβδινη επιφάνεια, ψηγμάτων. Το υλικό το οποίο αφαιρείται από την επιφάνεια του χάλυβα φέρει την εμπειρική ονομασία «αστάρι».



Εικόνα 2.9: Μηχανισμός ψηγματοβολής. [22]

Σημαντικοί παράγοντες, για ένα σωστό καθαρισμό, με ψηγματοβολή είναι :

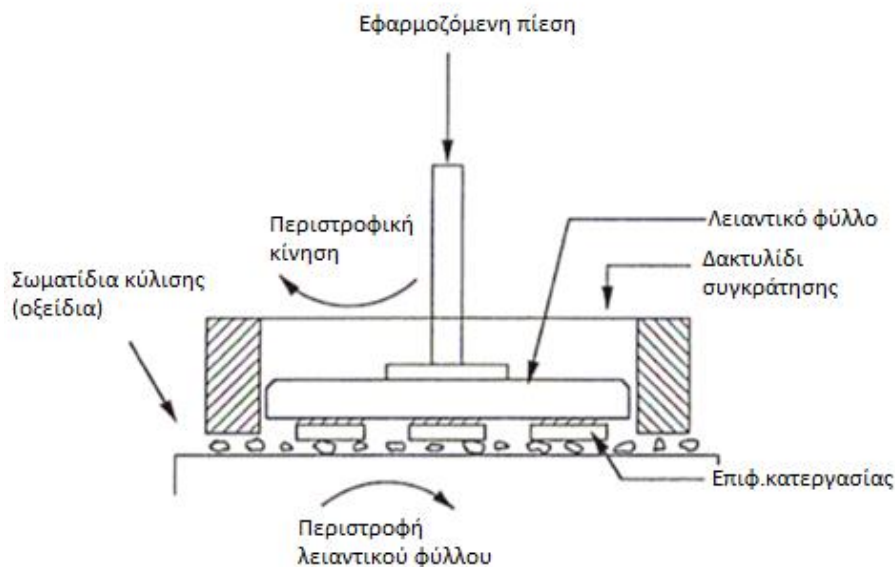
- Κατάλληλη επιλογή ψήγματος (υλικό, μέγεθος, πιθανή ρύπανση)
- Έγκαιρη απομάκρυνση σκόνης και ακαθαρσιών
- Κατάλληλη εκλογή πίεσης βολής - ξηρός αέρας (όταν χρησιμοποιείται αέρας)
- Κατάλληλος διαχωρισμός λαδιού/νερού
- Κατάλληλη αναλογία ψήγματος και μέσου μεταφοράς (αέρα ή νερό)

Επισημαίνεται ότι, ο καθαρισμός με ψηγματοβολή, προσδίδει στην χαλύβδινη επιφάνεια σημαντική τραχύτητα, η οποία στο κάθετο επίπεδο, φαίνεται σαν μια διαδοχή κορυφών και κοιλάδων και είναι γνωστή ως "roughness profile" (προφίλ τραχύτητας). Προφανώς το είδος του ψήγματος, η διάρκεια της βολής και οι συνθήκες υγρασίας επηρεάζουν την διαφορά ύψους (μεταξύ κορυφών και κοιλάδων) και την τελική τραχύτητα της επιφάνειας. Όσο πιο τραχυνμένη είναι μια επιφάνεια, τόσο περισσότερο χρώμα, χρειάζεται για να καλυφθεί επαρκώς. Κατά τον καθαρισμό με ψηγματοβολή, ιδιαίτερη προσοχή πρέπει να δοθεί, στις συνθήκες υγρασίας. Σε συνθήκες υγρασίας ο χάλυβας, που έχει καθαρισθεί με ψηγματοβολή, αρχίζει να σκουριάζει γρήγορα, γι' αυτό καλύτερα να αποφεύγεται η ψηγματοβολή σε τέτοιες καιρικές συνθήκες. Επίσης η διαφορά θερμοκρασίας, μεταξύ επιφάνειας και αέρα περιβάλλοντος, επηρεάζει την συμπύκνωση του νερού στον αέρα (εφύγρυνση). Η παρουσία ψυχρών υγρών στο εσωτερικό δεξαμενών αυξάνει την παραπάνω διαφορά. Για καλύτερα αποτελέσματα η θερμοκρασία της επιφάνειας του χάλυβα θα πρέπει να είναι τουλάχιστον  $3^{\circ}\text{C}$  μεγαλύτερη από το σημείο δρόσου του αέρα του περιβάλλοντος. Οι πιο σημαντικές μέθοδοι καθαρισμού με ψηγματοβολή είναι:

- Καθαρισμός με χρήση ακροφυσίων (nozzle-blasting).
- Καθαρισμός με χρήση φυγόκεντρου συμπιεστού (impeller/centrifugal blastcleaning).
- Καθαρισμός με υδατοβολή (water blast cleaning).
- Καθαρισμός με ψηγματοβολή εν κενώ (vacuum-blasting).

## 2.3 Ελεύθερη Λείανση / Στίλβωση<sup>11</sup>

Η ελεύθερη λείανση είναι μια κατεργασία η οποία χρησιμοποιεί λειαντικά όπως γυαλί, διαμάντι, καρβίδιο σιλικόνης και οξείδιο αλουμινίου για αφαίρεση υλικού και αποπεράτωση. Το λειαντικό σε αυτήν την περίπτωση συνήθως αναμιγνύεται με ένα υγρό για την κατασκευή ενός μίγματος το οποίο τοποθετείται ανάμεσα σε έναν σκληρό περιστρεφόμενο τροχό και το κατεργασμένο τεμάχιο. Το υγρό αυτό που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική μας διαδικασία ήταν διαφορετικό και είχε να κάνει με την προσδοκώμενη ακρίβεια που θέλαμε να προσδώσουμε στο δοκίμιο και επομένως το είδος του λειαντικού φύλλου που χρησιμοποιήθηκε. Ο περιστρεφόμενος τροχός είναι συνήθως κατασκευασμένος από σκληρυμένο χάλυβα. Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του συστήματος αποπεράτωσης που αναφέρθηκε παραπάνω:



Εικόνα 2.10: Σχηματικό διάγραμμα της κατεργασίας αποπεράτωσης. [23]

Επεξήγηση των όρων στην περίπτωση της αποπεράτωσης/λείανσης του ναυπηγικού χάλυβα ΑΗ36:

- i. Εφαρμοζόμενη πίεση: Πρόκειται για την πίεση που ασκούμε με το χέρι (εμπειρικά καθ'όλη τη διαδικασία) καθώς πιέζουμε την επιφάνεια του χάλυβα που θέλουμε να κατεργαστούμε πάνω στην επιφάνεια του φύλλου λείανσης. Υπάρχουν και προηγμένα συστήματα αυτόματης άσκησης πίεσης με χρήση ρομποτικών βραχιόνων, τα οποία ωστόσο έχει αποδειχθεί ότι δεν επιτυγχάνουν καλύτερη ακρίβεια από έναν έμπειρο χρήστη της διάταξης λείανσης. Αυτό συμβαίνει επειδή είναι εξαιρετικά δύσκολη η προσαρμογή μιας μηχανής στις ειδικές συνθήκες που διαμορφώνονται κατά τη διάρκεια της λείανσης.

[23]<sup>11</sup> <http://lms.mech.upatras.gr/LMS/files-1/students-area/mekhanourgike-tekhnologia-ergasterio-i/subject-files/ekpaideutiko-uliko/basics-of-grinding-leaflet.pdf>

- ii. Περιστροφική κίνηση: Πρακτικά πρόκειται για τη χειροκίνητη περιστροφή του κατεργασμένου χάλυβα αντίθετα από τη φορά περιστροφής του φύλλου λείανσης ώστε να πετύχουμε όσο το δυνατόν ομοιόμορφη κατανομή τραχύτητας στην κατεργαζόμενη επιφάνεια.
- iii. Σωματίδια κύλισης (οξείδια): Πρόκειται για οξείδια τα οποία έχουν αφαιρεθεί από της επιφάνεια αποπεράτωσης του κατεργαζόμενου χάλυβα τα οποία λειτουργούν και ως στιγμιαία στοιχεία κύλισης και επιβάλλουν την ιδιοπεριστροφή τους στην επιφάνεια αποπεράτωσης. Είναι ένας από τους βασικούς λόγους που η ταχύτητα περιστροφής του τροχού παρουσιάζει διακυμάνσεις καθ'όλη τη διάρκεια της κατεργασίας.
- iv. Επιφάνεια κατεργασίας: Πρακτικά η χαρακτηριστική διεπιφάνεια μεταξύ της επιφάνειας κατεργασίας του τεμαχίου και της επιφάνειας του λειαντικού φύλλου.
- v. Λειαντικό φύλλο: Πρόκειται για το δίσκο περιστροφής (φύλλο λείανσης)

Να σημειωθεί πως τα φύλλα λείανσης που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διαδικασία της αποπεράτωσης / στίλβωσης είναι διαφορετικά και διακρίνονται ανάλογα με το λειαντικό που βρίσκεται στην επιφάνεια του λειαντικού φύλλου π.χ γυαλί, διαμάντι, βελούδο κλπ καθώς και το μέγεθος των αποξεστικών κόκκων που διαθέτουν στην επιφάνειά τους. Στο δικό μας πειραματικό μέρος, χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά φύλλα με λειαντικό γυαλί (γυαλόχαρτο), λειαντικά φύλλα υψηλής ακρίβειας από ύφασμα, καθώς και φύλλα από βελούδο τα οποία χρησιμοποιήθηκαν στα τελικά στάδια της κατεργασίας ώστε να δημιουργηθεί η χαρακτηριστική επιφάνεια – καθρέπτης που είναι ουσιαστικά και το επιθυμητό αποτέλεσμα.

Ανάλογα με τη διάμετρο των κόκκων των λειαντικών φύλλων, υπάρχουν φύλλα διαφόρων κατηγοριών. Προφανώς, όσο μικρότερη είναι η διάμετρος των αποξεστικών κόκκων, τόσο περισσότερους κόκκους θα διαθέτει κάθε λειαντικό φύλλο και κατά συνέπεια η κατεργασία μετατρέπεται σταδιακά από κατεργασία αποπεράτωσης σε κατεργασία λείανσης / στίλβωσης. Με άλλα λόγια, όσο περισσότερους αποξεστικούς κόκκους διαθέτει το λειαντικό φύλλο, τόσο η κατεργασία αποσκοπεί στη δημιουργία επιφανειών χαμηλότερης τραχύτητας και άρα καλύτερης ποιότητας επιφανείας. Στη συνέχεια αναφέρονται επιγραμματικά κάποιες κατηγορίες λειαντικών φύλλων που χρησιμοποιήθηκαν στην κατεργασία αποπεράτωσης / λείανσης:

- P220: Πρόκειται για λειαντικά φύλλα που πρακτικά αποτελούνται από 220 αποξεστικά σωματίδια (Particles 220). Η διαδικασία που αποσκοπούν τα συγκεκριμένα φύλλα είναι καθαρά κατεργασία αποπεράτωσης. Λόγω της μεγάλης τριβής που αναπτύσσεται στη χαρακτηριστική διεπιφάνεια λειαντικού φύλλου – χάλυβα, τα συγκεκριμένα φύλλα είναι μόνο για μια χρήση συνήθως και ενδείκνυται η συχνή αντικατάστασή τους.
- P400: Ισχύει πάνω κάτω ό,τι αναφέρθηκε και για τα φύλλα P220 αλλά ο αριθμός των κόκκων έχει σχεδόν διπλασιαστεί ενώ το μέγεθος τους έχει προφανώς μειωθεί ώστε να επιτυγχάνεται μεγαλύτερη ακρίβεια και καλύτερη ποιότητα στην κατεργαζόμενη επιφάνεια.
- P800: Ομοίως με τα ανωτέρω και ο αριθμός των κόκκων έχει διπλασιαστεί συγκριτικά με τα φύλλα P400 ενώ το μέγεθος των κόκκων έχει ελαττωθεί. Επιτυγχάνεται καλύτερη ποιότητα επιφανείας.

...

- P1000: Ο αριθμός των αποξεστικών κόκκων γυαλιού έχει αυξηθεί αισθητά και η κατεργασία μετατρέπεται σταδιακά σε κατεργασία λείανσης.
- P2000: Ομοίως ο αριθμός κόκκων έχει διπλασιαστεί από την προηγούμενη κατηγορία και πρόκειται για λείανση ακριβείας. Τα λειαντικά φύλλα προφανώς λόγω μεγαλύτερου κόστους και μικρότερης τριβής που αναπτύσσεται στην επιφάνεια εργασίας δεν αντικαθιστώνται τόσο συχνά συγκριτικά με τα προηγούμενα στάδια.
- Λειαντικά φύλλα από ειδικό ύφασμα (clothe). Σε αυτό το σημείο κι έπειτα η κατεργασία αποβολής υλικού χαρακτηρίζεται ξεκάθαρα ως κατεργασία λείανσης. Αξίζει να τονισθεί πως στην προκειμένη πειραματική εργασία χρησιμοποιήθηκαν τρία διαφορετικά λειαντικά φύλλα από ύφασμα, κάθε ένα από τα οποία είχε διαφορετική χαρακτηριστική ακρίβεια. Αυτή η ακρίβεια, ανάλογα από την κατασκευαστική εταιρεία των λειαντικών φύλλων έχει διάφορες χαρακτηριστικές ονομασίες. Η εταιρεία Struers, η οποία κατασκευάζει αυτά τα φύλλα χωρίζει αυτές τις 3 υποκατηγορίες που αναφέρθηκαν ως εξής:
  - Λειαντικά φύλλα 3μm.
  - Λειαντικά φύλλα 1μm.
  - Λειαντικά φύλλα ¼ μm.

Προφανώς από πάνω προς τα κάτω έχουμε αύξηση της ακρίβεια επιφανείας του δοκιμίου που κατεργαστήκαμε. Στη συνέχεια αναφέρεται η τελευταία κατηγορία λειαντικών φύλλων που χρησιμοποιήθηκε στην προκειμένη πειραματική διαδικασία.

- Λειαντικά φύλλα που χρησιμοποιούν ως υλικό λείανσης το βελούδο, πρόκειται για λειαντικά φύλλα πολύ υψηλής ακριβείας. Πρακτικά δεν έχουμε αισθητή πλέον αφαίρεση υλικού από την κατεργαζόμενη επιφάνεια παρά μόνο σταδιακή στίλβωση, η οποία οδηγεί στο τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα που δεν είναι άλλο από το καθρέπτισμα της επιφάνειας του κατεργαζόμενου χάλυβα. Προφανώς τέτοια λειαντικά φύλλα επαναχρησιμοποιούνται αρκετές φορές καθώς δεν αναπτύσσεται σημαντική δύναμη τριβής στη χαρακτηριστική διεπιφάνεια μεταξύ λειαντικού φύλλου και τεμαχίου.

Στην εισαγωγή της ενότητας αυτής έγινε αναφορά στον όρο «μίγμα». Πρόκειται για λειαντική διαμαντόπαστα η οποία συνήθως αναμινύεται με αιθανόλη ώστε να δημιουργηθεί εν τέλει αυτό το μίγμα το οποίο απλώνεται ομοιόμορφα πάνω στο λειαντικό φύλλο. Σκοπός της δημιουργίας αυτού του μίγματος είναι η όσο το δυνατόν ελαχιστοποίηση της αναπτυσσόμενης τριβής και θερμότητας στην επιφάνεια εργασίας. Αν σε κάποιο στάδιο της αποπεράτωσης / λείανσης, παρατηρηθεί κάποιο αιφνίδιο «κόλυμμα» της επιφάνειας του χάλυβα πάνω στο λειαντικό φύλλο, υπάρχει ο κίνδυνος να τσακίσει το λειαντικό φύλλο, γεγονός που μας αναγκάζει να προβούμε σε αντικατάστασή του. Η διαμαντόπαστα για λόγους οικονομίας χρησιμοποιήθηκε μόνο όταν ως λειαντικό φύλλο είχαμε ύφασμα και βελούδο, ώστε να περιορίσουμε όσο το δυνατόν περισσότερο τη φθορά αυτών των λειαντικών φύλλων ώστε να επαναχρησιμοποιηθούν στο μέλλον.

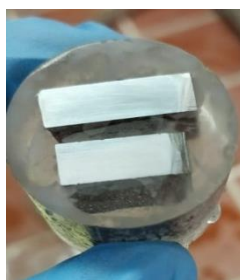
Τέλος, αξίζει να τονιστεί πως καθ'όλη τη διαδικασία της αποπεράτωσης / λείανσης, υπάρχει συνεχής ροή νερού όσμωσης γεγονός που συμβάλλει τόσο στη συνεχή απομάκρυνση οξειδίων που εμφανίζονται στην επιφάνεια εργασίας καθώς και στην καλύτερη απαγωγή θερμότητας.

Στη συνέχεια για λόγους πληρότητας, παρατίθενται ορισμένες εικόνες οι οποίες έχουν ως σκοπό την περαιτέρω επεξήγηση και κατανόηση της διαδικασίας αποπεράτωσης / λείανσης.





Εικόνα 2.11: Αρχικά δοκίμια κατεργαζόμενου χάλυβα.



Εικόνα 2.12: Τελική κατάσταση – καθρέπτισμα του κατεργαζόμενου χάλυβα.



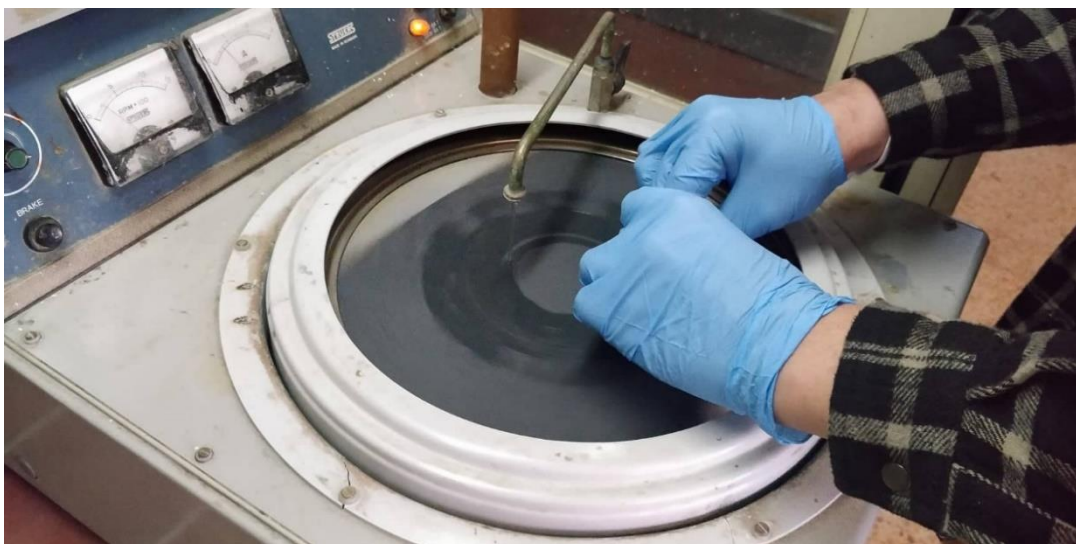
Εικόνα 2.13: Διαμαντόπαστα



Εικόνα 2.15: Ανάμιξη



Εικόνα 2.14: Υδροβολέας που περιέχει αιθανόλη



Εικόνα 2.14: Συνολική παρουσίαση της διαδικασίας αποπεράτωσης / στίλβωσης.

Στην ανωτέρω διαδικασία διακρίνονται τα ακόλουθα μέρη της διαδικασίας:

- Το λειαντικό φύλλο
- Η συνεχής ροή νερού όσμωσης πάνω στο λειαντικό φύλλο
- Η χειροκίνητη άσκηση πίεσης της επιφάνειας του τεμαχίου πάνω στο λειαντικό φύλλο
- Το δαχτυλίδι περίξ του οποίου στηρίζεται ο περιστρεφόμενος τροχός από σκληρό υλικό
- Δυο μετρητικές διατάξεις στο άνω αριστερά τμήμα της εικόνας

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί πως οι μετρητικές διατάξεις που χρησιμοποιούνται βοηθούν το χρήστη να έχει σε πραγματικό χρόνο επίγνωση της ροής της διαδικασίας αποπεράτωσης. Η αριστερή μετρητική διάταξη μας δείχνει τις στροφές του περιστρεφόμενου τροχού ενώ η δεξιά πρόκειται για ένα κλασικό αμπερόμετρο. Όσο μεγαλύτερης πυκνότητας κόκκων είναι το λειαντικό φύλλο (π.χ βελούδο) τόσο περισσότερες πρέπει να είναι οι στροφές του τροχού, δεδομένου ότι η διαδικασία στίλβωσης πραγματοποιείται σε πολύ αργό ρυθμό. Αντίθετα, όσο μικρότερη πυκνότητα κόκκων διαθέτουμε, τόσο μικρότερες πρέπει να είναι οι στροφές του τροχού καθώς σε υψηλές στροφές υπάρχει ο κίνδυνος να καταστραφεί το λειαντικό φύλλο καθώς και να πραγματοποιηθεί περαιτέρω (ανεπιθύμητη) αποβολή υλικού στην κατεργαζόμενη επιφάνεια.

Κατά την εκτέλεση της διαδικασίας αποπεράτωσης, όσο μεγαλύτερη είναι η ασκούμενη πίεση της κατεργαζόμενης επιφάνειας πάνω στην επιφάνεια του λειαντικού φύλλου, τόσο μεγαλύτερο φορτίο ασκείται στη διάταξη, άρα τόσο μεγαλύτερη αντίσταση παρατηρείται στις στροφές του περιστρεφόμενου τροχού. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την αύξηση της έντασης του ρεύματος τροφοδοσίας ώστε να υπάρξει αυτόματη εξισορρόπηση των στροφών του κινητήρα και άρα του περιστρεφόμενου τροχού. Το συμβάν αυτό μας υποδηλώνει έμμεσα το μέτρο της πίεσης που εφαρμόζουμε και επομένως μπορούμε να προβούμε άμεσα σε διορθωτικές κινήσεις.

## 2.4 Δοκιμή εφελκυσμού

Σε πρώτη φάση, μετά την υδροκοπή της αρχικής λαμαρίνας ναυπηγικού χάλυβα ΑΗ36 αρχικών διαστάσεων 1000 x 250 x 6.5 [mm] λάβαμε συνολικά 51 δοκίμια διαστάσεων 220 x 15 x 6.5 [mm]. Τα δοκίμια που θα χρειαστούμε για την πειραματική διαδικασία είναι συνολικά 33 αλλά κόπηκαν κάποια παραπάνω για λόγους ασφάλειας και ευχέρειας της διαδικασίας. Τα 3 από τα 33 δοκίμια, στο εξής θα αναφέρονται ως blank δοκίμια, αφού είναι τα μοναδικά δοκίμια τα οποία δεν υποβλήθηκαν σε διαβρωτικό περιβάλλον. Τα δοκίμια αυτά είναι τα υπ' αριθμόν 2,3,4 και κόπηκαν μηχανικά με χρήση σέγας ώστε η αρπάγη που θα εκτελούσε τη δοκιμή εφελκυσμού να έδενε τα δοκίμια κατά βέλτιστο τρόπο αφήνοντας μόνο το ενεργό μήκος του blank δοκιμίου ( $l_0$ ) που θα υποβαλλόταν σε θραύση. Στη συνέχεια λειάνθηκαν τα άκρα τους με χρήση λειαντικού τροχού από κορούνδιο (δεύτερο τη τάξει μέταλλο σε σκληρότητα μετά το διαμάντι) και τέλος υποβλήθηκαν σε δοκιμή εφελκυσμού χωρίς να έχουν αρχικά υποστεί κάποια άλλη χημική διεργασία, ψηγματοβολή ή διάβρωση όπως και υποβλήθηκαν τα υπόλοιπα 30 δοκίμια.

Αξίζει να σημειωθεί πως παρά τις ανωτέρω τροποποιήσεις δεν ήταν δυνατή η πειραματική μελέτη του μέτρου ελαστικότητας καθώς στις μηχανικές δοκιμές που υποβλήθηκαν τα δοκίμια υπεισέρχονται ακόμη σημαντικά σφάλματα τα οποία οφείλονται στη χρήση της αρπάγης για την υλοποίηση της δοκιμής και αυτό διότι δεν μπορούμε να αντισταθμίσουμε το μέτρο ελαστικότητας της ίδιας της αρπάγης στην πειραματική διαδικασία καθώς και να τοποθετήσουμε κάποιο αισθητήριο όργανο μέτρησης της επιμήκυνσης πάνω στα δοκίμια κατά τη διάρκεια των δοκιμών εφελκυσμού. Παρόλα αυτά, τα αποτελέσματα είναι σε σωστή τάξη μεγέθους και μας δίνεται η δυνατότητα για μια επικοινωνητική με όσο το δυνατόν λιγότερα σφάλματα σύγκριση των μηχανικών ιδιοτήτων μεταξύ θεωρητικών και πειραματικών τιμών για το δεδομένο υλικό (ναυπηγικός χάλυβας ΑΗ36).

Αρχικά υπολογίστηκε το αρχικό βάρος των blank δοκιμίων και έγινε η αρίθμηση τους ώστε μετά τη δοκιμή εφελκυσμού να γνωρίζουμε ποιά τμήματα των δοκιμίων που κόπηκαν ανήκουν στα αρχικά δοκίμια. Τέλος, έγινε σύγκριση των πειραματικών μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων από ναυπηγικό χάλυβα ΑΗ36 (όριο διαρροής, μέγιστη εφελκυστική τάση κλπ) όπως προέκυψαν από τη δοκιμή εφελκυσμού σε σχέση με τις αρχικές θεωρητικές μηχανικές ιδιότητες του ναυπηγικού χάλυβα ΑΗ36 που γνωρίζαμε από τη βιβλιογραφία και παρουσιάστηκε στο κεφάλαιο 1.

Στη συνέχεια παρατίθενται οι γενικές αρχές της κατεργασίας κοπής, δοκιμής εφελκυσμού, την οποία θα ξανα σχολιάσουμε στη συνέχεια στο Πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας όταν και θα παραθέσουμε τα πειραματικά δεδομένα που προέκυψαν από την κοπή και των 33 συνολικά δοκιμίων ναυπηγικού χάλυβα.

### Γενικές αρχές δοκιμής εφελκυσμού<sup>12</sup>

Η δοκιμή του εφελκυσμού είναι η συνηθέστερη μηχανική δοκιμή. Συνίσταται στην υποβολή σε εφελκυστική καταπόνηση δοκιμίου, του προς χαρακτηρισμόν υλικού, κατά τη διάρκεια της οποίας καταγράφεται η προκαλούμενη επιμήκυνση  $\Delta l$ . Σκοπός της εργαστηριακής

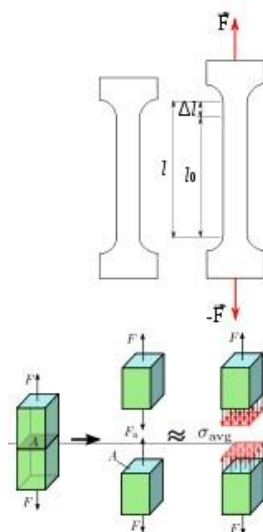
---

[24]<sup>12</sup> [http://antoxi-aspaite.blogspot.com/p/blog-page\\_06.html](http://antoxi-aspaite.blogspot.com/p/blog-page_06.html)

[25] <https://eclass.gunet.gr/modules/document/file.php/>

δοκιμής του εφελκυσμού είναι ο καθορισμός της συμπεριφοράς των υλικών όταν καταπονούνται σε εφελκυστικά φορτία και ο προσδιορισμός διαφόρων μηχανικών τους ιδιοτήτων, όπως είναι η τάση αναλογίας, η τάση διαρροής, η τάση θραύσης, το μέτρο ελαστικότητας του Young, κ.α.

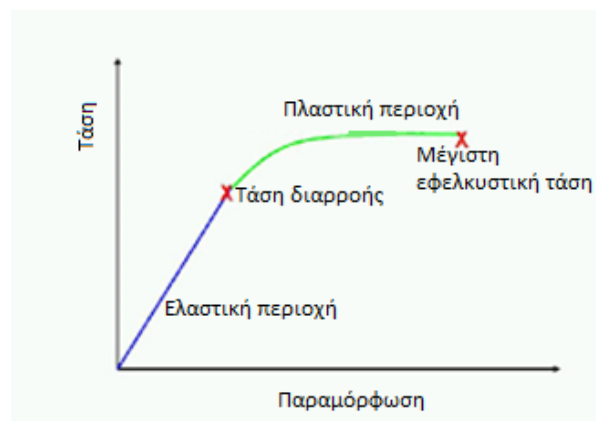
Τα δοκίμια του εφελκυσμού είναι, συνήθως, ράβδοι κυκλικής διατομής ή ελάσματα τυποποιημένων διαστάσεων. Η επιμήκυνση μετράται στο κεντρικό τμήμα του δοκιμίου που έχει σταθερή διατομή, ανάμεσα σε δύο χαραγές αναφοράς, που καθορίζουν το ωφέλιμο μήκος του δοκιμίου ( $l_0$ ). Το μήκος αυτό αντιστοιχεί σε μια χαρακτηριστική περιοχή του δοκιμίου που ονομάζεται "λαιμός". Τα άκρα του δοκιμίου, με τα οποία θα συγκρατηθεί από τις αρπάγες της μηχανής εφελκυσμού, έχουν μεγαλύτερη διατομή.



Σχήμα 2.15: Τυπικά δοκίμια εφελκυσμού [24]

Τα συνηθέστερα εργαστηριακά πειράματα γίνονται με τη βοήθεια είτε υδραυλικών είτε ηλεκτρονικών μηχανών με τις οποίες μπορούμε να επιβάλλουμε μέγιστο φορτίο τουλάχιστον 20 tn. Οι μετρήσεις των παραμορφώσεων γίνονται συνήθως με τη βοήθεια μηχανικών επιμηκυνσιομέτρων τα οποία τοποθετούνται στο τμήμα  $l_0$  του δοκιμίου κατά τη διάρκεια της μηχανικής δοκιμής και όχι όπως λανθασμένα συμβαίνει καμιά φορά πάνω στην αρπάγη ή εκτός του τμήματος  $l_0$  του δοκιμίου.

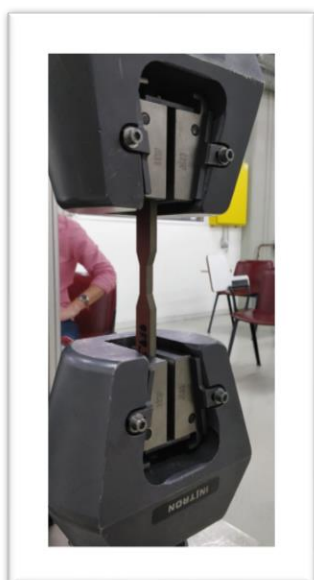
Τα βασικά «τμήματα» ενός τυπικού διαγράμματος τάσης-παραμόρφωσης σε δοκιμή εφελκυσμού ενός δοκιμίου χάλυβα με τα ανωτέρω χαρακτηριστικά είναι αυτό της εικόνας 2.16:



Εικόνα 2.16: Engineering Διάγραμμα τάσης – παραμόρφωσης. Χαρακτηριστικές περιοχές. [26]

Στη συνέχεια παρατίθενται ορισμένες εικόνες από τα 4 βασικά στάδια της δοκιμής εφελκυσμού ενός blank δοκιμίου που πραγματοποιήθηκε στο Εργαστήριο Κατεργασιών (κτήριο Ξ) της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Στις εικόνες αυτές φαίνονται τα εξής στάδια:

1. Πρώτη φάση – Απαραμόρφωτο δοκίμιο
2. Δεύτερη φάση – Ελαστική παραμόρφωση
3. Τρίτη φάση – Πλαστική παραμόρφωση
4. Τέταρτη φάση – Θραύση δοκιμίου



### 3 Φαινόμενα διάβρωσης και Ηλεκτροχημεία<sup>13</sup>

Είναι γνωστό ότι οποιοδήποτε κατασκεύασμα χρειάζεται συντήρηση προκειμένου να μπορεί να ανταποκριθεί στο χρόνο και κατ' επέκταση στο σκοπό για τον οποίο έχει κατασκευαστεί. Αυτό ισχύει και για το πλοίο και για οποιαδήποτε εργοστασιακή εγκατάσταση. Εάν επικεντρωθούμε στη Ναυπηγοεπισκευαστική Βιομηχανία και συγκεκριμένα στο πλοίο, είναι γνωστό ότι αν δε συντηρηθεί, αργά ή γρήγορα θα χάσει την αξία του και τη χρησιμότητά του. Ο σημαντικότερος λόγος συντήρησης – προστασίας της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου είναι η πρόληψη της φθοράς και ζημιών που προκύπτουν από την οξείδωση του ελάσματος.

Η μη σωστή συντήρηση και προστασία του πλοίου από την οξείδωση μπορεί να έχει ως αποτέλεσμα την καταστροφή του, τη ρύπανση των μεταφερόμενων φορτίων ή και του περιβάλλοντος. Η φθορά που προξενεί η οξείδωση – διάβρωση στο αρχικά υπολογισμένο πάχος των στοιχείων της κατασκευής, συνεπάγεται τη μείωση της αντοχής της. Εάν ληφθούν

[30]<sup>13</sup> "Διάβρωση και προστασία υλικών" Σύγγραμμα, Βασιλείου Π., Σκουλικίδης Θ., 2007, Συμειών, ISBN: 978-960-7888-85-3

[34]<https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:8044:ed-3:v1:en:term:2.01>

[35]<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01161200>



υπόψη και οι ισχύοντες αυστηροί κανονισμοί σχετικά με την κατάσταση της κατασκευής, είναι ευνόητο πόσο σημαντική και απαραίτητη είναι η προστασία και η συντήρηση των ελασμάτων του πλοίου. Για την αντιμετώπιση της οξείδωσης χρειάζεται προετοιμασία της επιφάνειας και στη συνέχεια η προστασία της επιφάνειας με χρωματισμό. Όπως αναφέραμε ο εχθρός των μεταλλικών κατασκευών είναι η οξείδωση.

Πώς όμως μπορεί να προστατευθεί ένα έλασμα, ή ένα μεταλλικό κατασκεύασμα γενικότερα, από την οξείδωση;

Προφανώς όταν θα μπορεί να υπάρξει ένα εμπόδιο (φράγμα) μεταξύ του ελάσματος και των εχθρικών παραγόντων που επιφέρουν τη οξείδωση. Προκειμένου να γίνει τούτο επιστρέφεται η επιφάνεια με το κατάλληλο σύστημα χρωματισμού, το οποίο μπορεί να αποτρέψει μια σημαντική αντικατάσταση ελασμάτων στο μέλλον ή και άλλες δυσμενείς επιπτώσεις στο πλοίο, στο περιβάλλον και στον άνθρωπο κατ' επέκταση. Αυτή η μεμβράνη ή στρώμα χρώματος είναι αδιαπέραστο εμπόδιο που αποτρέπει την επαφή του ελάσματος με την υγρασία, οξυγόνο ή και χημικούς παράγοντες που δημιουργούν την οξείδωση. Για την επίστρωση, όμως, του κατάλληλου χρώματος και τη σωστή πρόσφυση τούτου στη μεταλλική επιφάνεια, απαιτείται κατάλληλη προετοιμασία του υποστρώματος, σύμφωνα πάντα με τις ισχύουσες προδιαγραφές.

Η καταλληλότητα αυτή της επιφάνειας επιτυγχάνεται κατά κύριο και πλέον αποτελεσματικό τρόπο με την ψηγματοβολή. Η καλή προετοιμασία της μεταλλικής επιφάνειας σε συνδυασμό με το σωστό χρωματισμό είναι το κλειδί της μακράς διάρκειας καλής συμπεριφοράς των προστατευθέντων επιφανειών.

### 3.1 Ορισμός - Γενικά χαρακτηριστικά του φαινομένου<sup>14</sup>

Η διάβρωση ορίζεται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους, αλλά η συνήθης ερμηνεία του όρου είναι: “αλληλεπίδραση ενός μετάλλου με το περιβάλλον του, που έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή των ιδιοτήτων του μετάλλου και που συχνά μπορεί να καταλήξει στην υποβάθμιση της λειτουργίας του μετάλλου, του περιβάλλοντος ή του τεχνικού συστήματος, που αυτά αποτελούν τμήμα του (ISO 8044 ,2015).”

Η έννοια της διάβρωσης μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε πιο ευρύ πεδίο, όπου συμπεριλαμβάνεται και η επίθεση σε μη μεταλλικά υλικά, αλλά τέτοιου είδους περιπτώσεις διάβρωσης είναι εκτός της οπτικής γωνίας της παρούσας διπλωματικής.

Διάβρωση εν γένει θεωρείται η καταστρεπτική επίθεση που υφίσταται ένα μέταλλο από το περιβάλλον του με ηλεκτροχημική ή χημική αντίδραση. Η υποβάθμιση του υλικού από φυσικά αίτια δεν ονομάζεται διάβρωση αλλά εκτριβή, φθορά. Σε μερικές περιπτώσεις η χημική επίθεση συνοδεύεται και από φυσική υποβάθμιση.

Παραδείγματα αυτής είναι η διάβρωση λόγω απόξεσης και λόγω εκτριβής. Η διάβρωση των μετάλλων και των κραμάτων είναι εντονότερη και ταχύτερη και έχει ως συνέπεια μεγαλύτερες οικονομικές επιπτώσεις από ότι η διάβρωση άλλων υλικών (όπως π.χ. ξύλο, πέτρα, μάρμαρα, πλαστικά κλπ). Το γεγονός αυτό οφείλεται στις διαφορετικές φυσικές και

---

[34]<sup>14</sup> <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:8044:ed-3:v1:en:term:2.01>

χημικές ιδιότητες που κατέχουν τα μέταλλα και τα κράματα αυτών, οι οποίες οδηγούν σε μεγαλύτερη τάση για υποβάθμιση, δηλαδή διάβρωση.

Ο έλεγχος της διάβρωσης μπορεί να επιτευχθεί με την αναγνώριση και την κατανόηση των μηχανισμών του φαινομένου, με τη χρήση και το σχεδιασμό υλικών ανθεκτικών στη διάβρωση, και με τη χρήση και εφαρμογή συστημάτων και μεθόδων προστασίας.

Η οξείδωση είναι λίγο πολύ το ίδιο με το να λέμε σκωρία ή σκωρίαση. Η σκωρία γίνεται όταν το μέταλλο περνά από τη διαδικασία της οξείδωσης. Ο σίδηρος και ο χάλυβας δε βρίσκονται στη φυσική τους μορφή, αλλά προέρχονται από το μέταλλευμα μαζί με κάρβουνο ή κόκ.

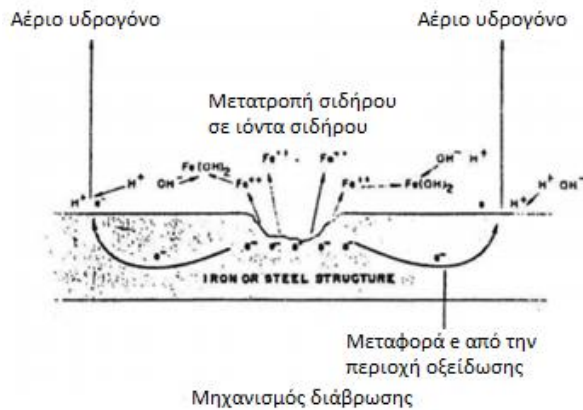
Μερικά συστατικά του χάλυβα φθείρονται ή οξειδώνονται κατά την απελευθέρωση ενέργειας, δηλαδή το μέταλλο σκουριάζει. Προκειμένου να έχουμε αυτή τη δράση πρέπει να έχουμε τις ίδιες συνθήκες σε ένα έλασμα, όπως συμβαίνει και σε μια μπαταρία. Ένα ηλεκτρικό στοιχείο ή μπαταρία έχει ως γνωστό δυο άκρα-πόλους (την άνοδο και την κάθοδο). Σε μια μπαταρία έχουμε το οξύ ως ηλεκτρολύτη. Ο χάλυβας, εάν παρατηρηθεί σε μεγέθυνση, αποτελείται πλήρως από ανωμαλίες και πόρους. Σε αυτά τα σημεία η υγρασία ή το νερό είναι εύκολο να συγκεντρωθούν και έτσι με τις ακαθαρσίες του μετάλλου ή με το αλάτι δημιουργούν ηλεκτρολύτη. Επιπλέον, επειδή το οξυγόνο του αέρα αντιδρά με το σίδηρο όταν απελευθερώνεται ηλεκτρική ενέργεια, με την παρουσία του αέρα είναι φυσικό να αρχίσει η διαδικασία της οξείδωσης.

Ένα έλασμα το οποίο δεν προστατεύεται και εκτίθεται στον αέρα και την υγρασία, εκλύει ένα μεγάλο αριθμό από μικροσκοπικά στοιχεία τα οποία μπορούν κάλλιστα να συγκριθούν με μια φορτισμένη μπαταρία. Έτσι η ενέργεια η οποία αρχικά δόθηκε για τη δημιουργία του μετάλλου, εκλύεται, με αποτέλεσμα να δημιουργείται σκωρία. Χημικά θα μπορούσαμε να πούμε ότι η σκωρία είναι το ίδιο με το σιδηρομετάλλευμα. Ο κύκλος έχει ολοκληρωθεί και είμαστε στην αρχή της φυσικής κατάστασης στην οποία ο σίδηρος και ο χάλυβας συναντώνται. Με άλλα λόγια, η οξείδωση είναι μια φυσική ηλεκτροχημική αντίδραση που γίνεται από :

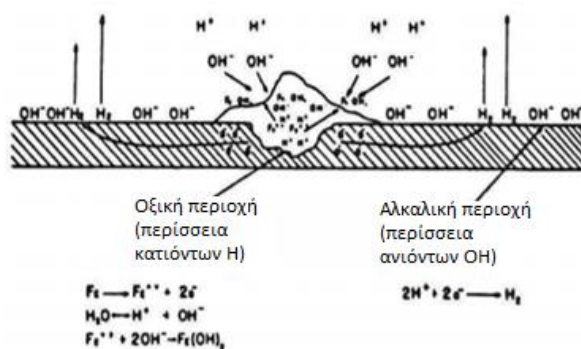
- Μια ανοδική αντίδραση
- Μια καθοδική αντίδραση
- Έναν ηλεκτρολύτη (νερό ή υγρασία) και
- Μια αγώγιμη επιφάνεια (έλασμα)

Εξαλείφοντας μια από αυτές τις αντιδράσεις αποφεύγουμε την οξείδωση. Η εφαρμογή ενός συστήματος χρωματισμού δρα σαν εμπόδιο μεταξύ του αέρα, της υγρασίας (πολύ περισσότερο της θάλασσας) και του μεταλλικού υποστρώματος, επιτυγχάνοντας έτσι μια επιβράδυνση ή σταμάτημα της καθοδικής αντίδρασης.





Εικόνα 3.1: Τυπικό διάγραμμα της διαδικασίας της διάβρωσης [36]



Εικόνα 3.2: Διάγραμμα της διαδικασίας της διάβρωσης, δείχνοντας τις οξικές και αλκαλικές περιοχές. [36]

### 3.2 Παράγοντες που επηρεάζουν τη διάβρωση των μετάλλων<sup>15</sup>

Το φαινόμενο της διάβρωσης καθορίζεται από πολλούς διαφορετικούς παράγοντες εκ των οποίων οι σημαντικότεροι, καθώς και ο ρόλος τους στο φαινόμενο καθορίζονται στη συνέχεια.

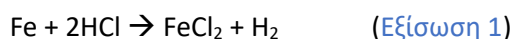
- **Θερμοκρασία** : Όπως όλες οι χημικές αντιδράσεις, ο ρυθμός της διάβρωσης αυξάνεται με την αύξηση της θερμοκρασίας.
- **pH** : Γενικά, όσο η τιμή του pH τείνει προς περισσότερο όξινες ή βασικές τιμές, αυξάνεται και η ταχύτητα της διάβρωσης.
- **Παρουσία οξυγόνου** : Η παρουσία οξυγόνου αυξάνει την ταχύτητα της διάβρωσης του σιδήρου καθώς και πολλών άλλων μετάλλων.
- **Διαβρωτικά στοιχεία**: Η συγκέντρωση και το είδος των διαβρωτικών παραγόντων στο περιβάλλον στο οποίο εκτίθεται το μέταλλο επηρεάζει τόσο το ποσοστό εμφάνισης της διάβρωσης, όσο και το ρυθμό του φαινομένου.
- **Ταχύτητα κίνησης του διαβρωτικού περιβάλλοντος** : Αυξάνει τη διάβρωση είτε απομακρύνοντας το προστατευτικό στρώμα των προϊόντων διάβρωσης από την επιφάνεια του μετάλλου εκθέτοντας έτσι τα απρόσβλητα ως τότε τμήματα στο διαβρωτικό περιβάλλον, είτε επηρεάζοντας τη διάχυση ιόντων του διαλύματος (για παράδειγμα αυξημένη ροή νερού σε κάποιο σωλήνα).

[27]<sup>15</sup> [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/TEE\\_EVOIAS/XALIBON%20OPLISMOY.pdf](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/TEE_EVOIAS/XALIBON%20OPLISMOY.pdf)

- **Επαφή ανόμοιων μετάλλων :** Η επαφή ανόμοιων μετάλλων προκαλεί τη δημιουργία γαλβανικού ζεύγους και ως εκ τούτου επιταχύνει την εμφάνιση διάβρωσης .
- **Ανομοιογένεια επιφάνειας :** Η αύξηση της ανομοιογένειας (χημική σύσταση ή γεωμετρικές ατέλειες, αταξίες δομής) της επιφάνειας, αυξάνει και τη διάβρωση.
- **Πλαστικές παραμορφώσεις :** Οι μηχανικές ή θερμικές κατεργασίες χωρίς ανόπτηση, οδηγούν τοπικά στη δημιουργία σημείων περισσότερο ανοδικών (ενεργειακά αναβαθμισμένων), με συνέπεια την εμφάνιση τοπικών γαλβανικών στοιχείων, που επιτείνουν το φαινόμενο.
- **Μηχανικές τάσεις :** Η ύπαρξη εσωτερικών μηχανικών τάσεων επιταχύνει τη διάβρωση και οδηγεί συχνά σε ψαθυρή θραύση της μεταλλικής κατασκευής.
- **Ύπαρξη τριεπιφάνειας :** Σε κάθε περίπτωση που υπάρχει τριεπιφάνεια (χάλυβας-θαλασσινό νερό-αέρας) όπως π.χ. στην ίσαλο γραμμή των πλοίων, η διάβρωση του μετάλλου ή του κράματος είναι εντονότερη.
- **Εναλλαγή του διαβρωτικού περιβάλλοντος ή των ιδιοτήτων του :** Γενικά η εναλλαγή ή διακύμανση ιδιοτήτων του διαβρωτικού περιβάλλοντος, αυξάνουν τη διάβρωση.
- **Ακτινοβολίες :** Η έκθεση των μετάλλων ή κραμάτων σε ακτινοβολία συνεπάγεται τη δημιουργία πρόσθετων αταξιών δομής που καθιστούν το μέταλλο πιο ανοδικό (ενεργειακά αναβαθμισμένο) και προκαλούν την ταχύτερη διάβρωση του.

### 3.3 Ηλεκτροχημεία της διάβρωσης<sup>16</sup>

Η φύση της διάβρωσης είναι κατ' εξοχήν ηλεκτροχημική, δηλαδή εμπεριέχει μεταφορά ηλεκτρονίων. Για να περιγράψουμε την ηλεκτροχημική διεργασία της διάβρωσης, θα θεωρήσουμε Σίδηρο (Fe) σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέως (HCl). Όταν το μέταλλο τοποθετηθεί στο διάλυμα αυτό, λαμβάνει χώρα η παρακάτω αντίδραση:



Η εξίσωση αυτή ανάγεται σε δύο απλούστερες: μία οξειδωση και μία αναγωγή.

- Οξείδωση (Ανοδική αντίδραση)  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$  (Εξίσωση 2)
- Αναγωγή (Καθοδική αντίδραση)  $2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2$  (Εξίσωση 3)

Ο σίδηρος στο διάλυμα HCl οξειδώνεται προς ιόντα σιδήρου  $\text{Fe}^{2+}$  και τα ιόντα υδρογόνου ανάγονται προς αέριο υδρογόνο.

[34]<sup>16</sup> <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:8044:ed-3:v1:en:term:2.01>

[36]<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/9781845640323/9781845640323006FU1.pdf>

[38]<https://epubs.scu.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1047&context=acmsm23>

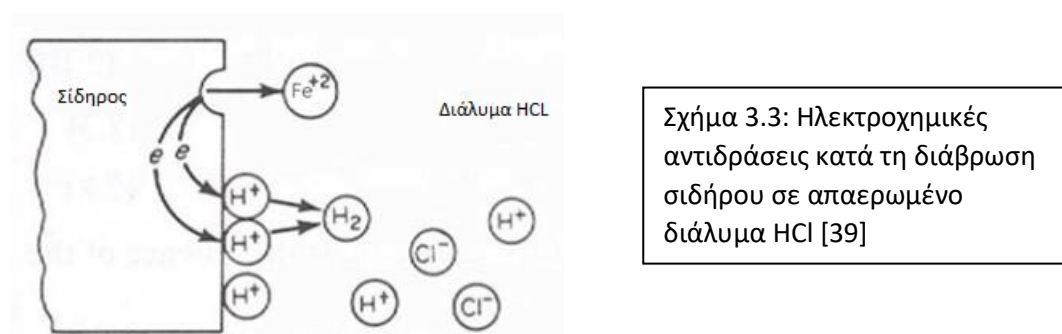
[39]<http://users.sch.gr/marbagana/entheta/entheta03.html>

Η οξείδωση ή ανοδική αντίδραση χαρακτηρίζεται από αύξηση στο φορτίο (παραγωγή ηλεκτρονίων). Μείωση του φορτίου (κατανάλωση ηλεκτρονίων) υποδεικνύει αναγωγή ή καθοδική αντίδραση. Στις εξισώσεις (Εξίσωση 2) και (Εξίσωση 3) παρουσιάζονται οι επιμέρους αντιδράσεις, οι οποίες συμβαίνουν ταυτόχρονα και με τον ίδιο ρυθμό στην επιφάνεια του μετάλλου. Αν δεν συνέβαινε αυτό, το μέταλλο θα αποκτούσε αμέσως ηλεκτρικό φορτίο.

Η παρατήρηση αυτή αποτελεί μία από τις βασικότερες αρχές της διάβρωσης: κατά τη διάβρωση των μετάλλων, ο ρυθμός της οξείδωσης ισούται με το ρυθμό της αναγωγής (με όρους παραγωγής και δαπάνης ηλεκτρονίων).

Η ανωτέρω αρχή παρουσιάζεται σχηματικά στο Σχ. 3.3.

Ένα άτομο σιδήρου μετατρέπεται σε ιόν σιδήρου και ελευθερώνονται δύο ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά που παραμένουν στην επιφάνεια του μετάλλου, καταναλώνονται αμέσως από την αναγωγή των ιόντων του υδρογόνου. Στο σχήμα αυτό οι δύο διεργασίες παρουσιάζονται ξεχωριστά για λόγους ευκρίνειας. Ανεξάρτητα από το αν οι δύο διεργασίες είναι διαχωρισμένες ή συμβαίνουν στο ίδιο σημείο της επιφάνειας, η αρχή διατήρησης του φορτίου δεν επηρεάζεται.



Η ανοδική αντίδραση σε κάθε περίπτωση διάβρωσης είναι η οξείδωση του μετάλλου (M) προς τα ιόντα του :

$$M \rightarrow M^{n+} + ne^- \quad (\text{Εξίσωση 4})$$

Σε κάθε περίπτωση ο αριθμός των ηλεκτρονίων που παράγονται ισούται με το φορτίο του ιόντος.

Υπάρχουν ωστόσο, πολλές διαφορετικές καθοδικές αντιδράσεις που συμμετέχουν στη διάβρωση των μετάλλων. Οι συνηθέστερες είναι :

- Έκλυση υδρογόνου  $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$  (Εξίσωση 5)
- Αναγωγή οξυγόνου (όξινα διαλύματα)  $O_2 + 4H^+ + 4e^- \rightarrow 2H_2O$  (Εξίσωση 6)
- Αναγωγή οξυγόνου (ουδέτερα ή βασικά διαλύματα)  $O_2 + 2H_2O + 4e^- \rightarrow 4OH^-$  (Εξίσωση 7)
- Αναγωγή ιόντων μετάλλου  $M^{3+} + e^- \rightarrow M^{2+}$  (Εξίσωση 7)
- Απόθεση μετάλλου  $M^+ + e^- \rightarrow M$  (Εξίσωση 8)

Η έκλυση υδρογόνου αποτελεί κοινή καθοδική αντίδραση αφού οξέα και όξινα μέσα συναντώνται συχνά. Επίσης η αναγωγή του οξυγόνου είναι συνήθης αφού κάθε υδατικό διάλυμα σε επαφή με τον αέρα μπορεί να παράξει αυτήν την αντίδραση. Οι αντιδράσεις της

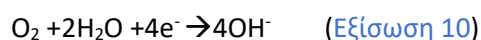
αναγωγής του μετάλλου καθώς και της απόθεσης δε συμβαίνουν πολύ συχνά, αλλά αποτελούν μέρος χημικών διεργασιών. Όλες οι ανωτέρω αντιδράσεις πραγματοποιούνται με δαπάνη ηλεκτρονίων.

Με βάση τις ανωτέρω επιμέρους αντιδράσεις ερμηνεύονται ουσιαστικά όλα τα θέματα της διάβρωσης.

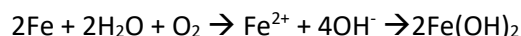
Στην περίπτωση σιδήρου εμβαπτισμένου σε νερό ή θαλασσινό νερό που εκτίθεται στην ατμόσφαιρα και διαβρώνεται, η ανοδική αντίδραση είναι :



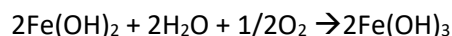
Αφού το υδατικό μέσο εκτίθεται στην ατμόσφαιρα, περιέχει διαλυμένο οξυγόνο. Το νερό και το θαλασσινό νερό είναι σχεδόν ουδέτερα διαλύματα και γι' αυτό η καθοδική αντίδραση είναι η ακόλουθη :



Έχοντας υπόψη ότι τα ιόντα του νατρίου και του χλωρίου δε συμμετέχουν στην αντίδραση, η συνολική αντίδραση από τις (Εξίσωση 9) και (Εξίσωση 10) είναι :



Από το διάλυμα κατακρημνίζεται υδροξείδιο του σιδήρου  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ .



Ωστόσο, η ένωση αυτή δεν είναι σταθερή σε διαλύματα που περιέχουν οξυγόνο και έτσι οξειδώνεται σε σιδηρούχο άλας, που αποτελεί και το τελικό προϊόν (κοινή σκουριά).

Επειδή οι αντιδράσεις οξείδωσης και αναγωγής στη διάβρωση είναι αλληλοεξαρτώμενες, μείωση του ρυθμού διάβρωσης μπορεί να επιτευχθεί με μείωση του ρυθμού πραγματοποίησης κάθε αντίδρασης. Αν η επιφάνεια του μετάλλου καλύπτεται από βαφή ή άλλο μη αγώγιμο υλικό οι ρυθμοί οξείδωσης και αναγωγής μειώνονται δραστικά και η διάβρωση επιβραδύνεται.

Οι αναστολείς διάβρωσης είναι ουσίες οι οποίες όταν προστίθενται σε διαβρωτικό μέσο μειώνουν τη διαβρωτικότητα του. Οι αναστολείς διάβρωσης δρουν παρεμβαίνοντας στην καθοδική αντίδραση, στην ανοδική ή και στις δύο. Πολλές από αυτές τις ουσίες είναι οργανικές. Δημιουργούν αδιαπέραστη μεμβράνη στην επιφάνεια του μετάλλου ή παρεμβαίνουν στην αντίδραση οξείδωσης ή αναγωγής.

Αύξηση της ηλεκτρικής αντίστασης του ηλεκτρολύτη συνεπάγεται μείωση της διάβρωσης. Το καθαρό νερό είναι πολύ λιγότερο διαβρωτικό από το ακάθαρτο ή το φυσικό νερό. Αντίστοιχα, το νερό όσμωσης που χρησιμοποιήθηκε στο πειραματικό κομμάτι για τη διαμόρφωση των συνθηκών διάβρωσης θαλάσσιου περιβάλλοντος στα δοκίμια είναι πολύ λιγότερο διαβρωτικό από το φυσικό νερό διότι έχει πολύ χαμηλή περιεκτικότητα σε άλατα. Η χαμηλή διαβρωτικότητα του νερού υψηλής καθαρότητας οφείλεται στην υψηλή ηλεκτρική του αντίσταση.

### 3.4 Θερμοδυναμική της διάβρωσης <sup>17</sup>

Όλα τα μέταλλα (και αυτά που προορίζονται για ναυπηγική χρήση) με εξαίρεση το χρυσό, τον υδράργυρο και το λευκόχρυσο δε βρίσκονται στη φύση σε καθαρή μορφή αλλά σε οξειδωμένα (μεταλλεύματα). Έτσι, τα μεταλλεύματα μετατρέπονται σε μέταλλα με κατάλληλες φυσικοχημικές κατεργασίες στις οποίες απαιτείται ενέργεια. Ένα μέρος της ενέργειας αυτής με τη μορφή εντροπίας ( $\Delta S$ ) και ελεύθερης ενέργειας ( $\Delta G$ ) παραμένει στα μεταλλικά υλικά.

Η αύξηση της ελεύθερης ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα τα μέταλλα να αποκτούν μεγαλύτερη εσωτερική ενέργεια από αυτή του αρχικού μεταλλεύματος. Κάθε υλικό που έχει κατασκευαστεί με μία σειρά διεργασιών είναι συνήθως υλικό αναβαθμισμένο ενεργειακά σε σχέση με τις πρώτες ύλες του. Επομένως, σύμφωνα με τον δεύτερο θερμοδυναμικό νόμο, έχει την προδιάθεση να ελαττώσει την ελεύθερη ενέργεια ( $G$ ) ή την ελεύθερη ενθαλπία ( $H$ ) και να αυξήσει την εντροπία του ( $S$ ). Έχει την τάση να υποβαθμιστεί ενεργειακά, γεγονός που στη περίπτωση των μετάλλων και των κραμάτων ισοδυναμεί με τάση προς οξείδωση (επιστροφή στην αρχική τους κατάσταση) με ταυτόχρονη έκλυση θερμότητας. Αυτή είναι η αιτία διάβρωσης των μεταλλικών υλικών. Μια ηλεκτροχημική δράση, η οποία εξελίσσεται από μία κατάσταση Α προς μία κατάσταση Β, είναι θερμοδυναμικά δυνατή μόνο όταν η μετάβαση από την κατάσταση Α στην κατάσταση Β συνοδεύεται από μείωση της ελεύθερης ενέργειας  $\Delta G$  του συστήματος. Στην περίπτωση των ηλεκτροχημικών δράσεων ισχύει :

$$\Delta G = -nFE$$

Όπου:

- $n$  : ο αριθμός των ηλεκτρονίων που ανταλλάσσονται κατά την αντίδραση
- $F$  : η σταθερά του Faraday ( $96490 \text{ Cb} \cdot \text{mol}^{-1}$ )
- $E$  : το δυναμικό ισορροπίας μεταξύ των καταστάσεων Α και Β.

Η μετάβαση από το Α στο Β δεν είναι δυνατή παρά μόνο όταν η διαφορά των δυναμικών ισορροπίας μεταξύ των καταστάσεων Β και Α είναι αρνητική ( $\Delta E < 0$ ), δηλαδή όταν  $E_A > E_B$ . Η παραπάνω συνθήκη αν και αναγκαία δεν είναι ικανή για την πραγματοποίηση της δράσης ΑΒ. Πρέπει, επιπλέον η ταχύτητα της δράσης να μην είναι αμελητέα.

Στον Πίνακα 3.4, δίνεται η μεταβολή της πρότυπης ελεύθερης ενέργειας  $\Delta G_0$  κατά Gibbs κατά το σχηματισμό τεσσάρων χαρακτηριστικών οξειδίων μετάλλων σε θερμοκρασία 25 °C (298 K).

[40]<sup>17</sup>[http://www.chemeng.ntua.gr/dpms\\_ylika/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%94.%20%CE%A5%CF%86%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE.pdf](http://www.chemeng.ntua.gr/dpms_ylika/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%94.%20%CE%A5%CF%86%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE.pdf)

[41][http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/2921/iosifidoua\\_corrosion.pdf?sequence=3](http://dspace.lib.ntua.gr/dspace2/bitstream/handle/123456789/2921/iosifidoua_corrosion.pdf?sequence=3)

Οξειδοαναγωγική δράση	Οξείδιο	$\Delta G^0$ σε kJ/mol
$2\text{Cu} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow$	$\text{Cu}_2\text{O}$	-146.0
$\text{Fe} + \frac{1}{2} \text{O}_2 \rightarrow$	$\text{FeO}$	-245.1
$2\text{Cr} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	-1058.1
$2\text{Al} + \frac{3}{2} \text{O}_2 \rightarrow$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	-1582.4

Πιν 3.4: Μεταβολή της ελεύθερης ενθαλπίας  $\Delta G_0$  κατά Gibbs. [40]

Από τον πίνακα 3.4 φαίνεται ότι το αλουμίνιο Al έχει τη μεγαλύτερη τάση μεταξύ των τεσσάρων μετάλλων να μετατραπεί σε οξείδιο. Το γεγονός αυτό, οδηγεί σε πρώτη φάση στην αίσθηση ότι οι κατασκευές αλουμινίου θα έπρεπε να είναι ιδιαίτερα ευπαθείς σε φαινόμενα οξείδωσης. Στην πράξη όμως το αλουμίνιο ενώνεται αμέσως με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας δημιουργώντας λεπτή στοιβάδα οξειδίου που είναι πολύ συνεκτική με το μέταλλο, με αποτέλεσμα να το προστατεύει από την περαιτέρω οξείδωση (παθητικοποίηση). Το φαινόμενο αυτό βρίσκει εφαρμογή ως μέθοδος προστασίας του Al (ανοδίωση).

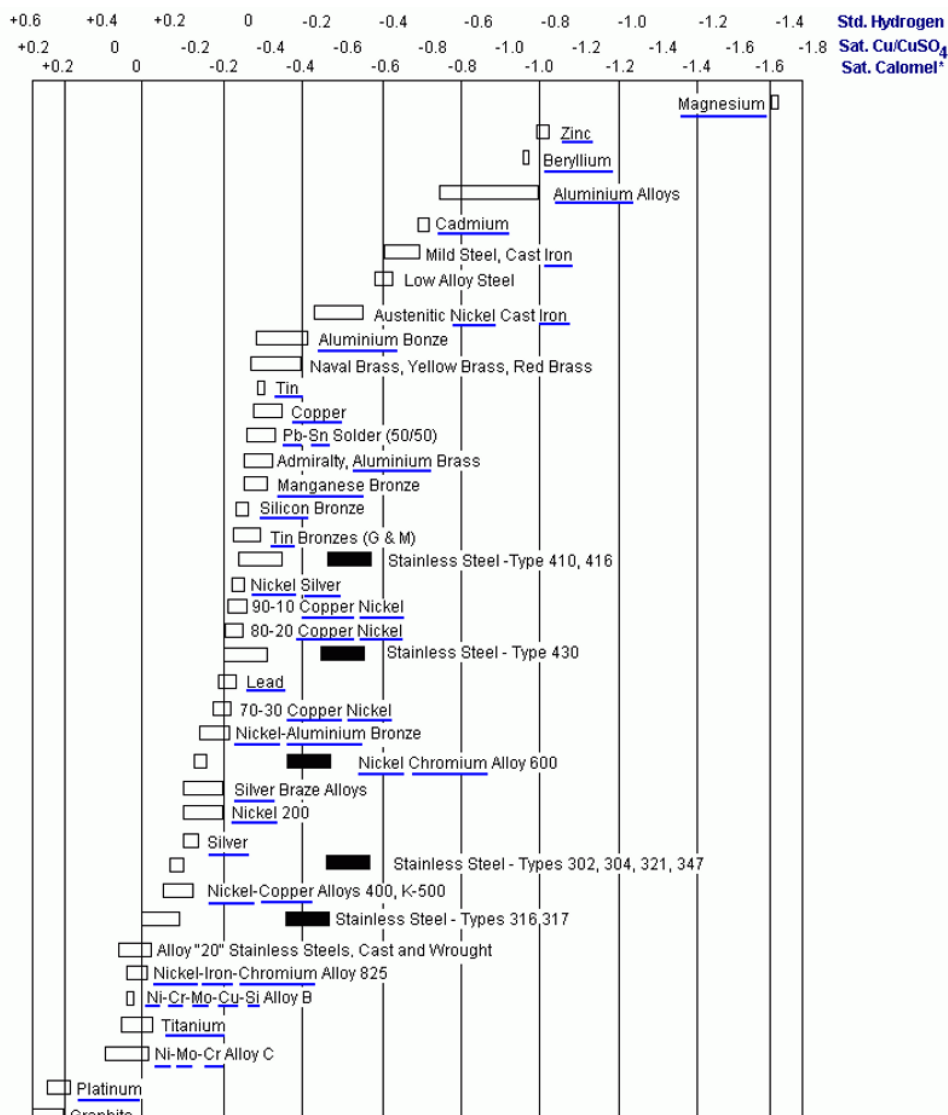
Από τον πίνακα 3.4 φαίνεται επίσης ότι ο χαλκός έχει τη μικρότερη τάση σχηματισμού οξειδίου, που σημαίνει ότι δε διαβρώνεται εύκολα παρουσία οξυγόνου. Από τα προηγούμενα οδηγούμαστε στα συμπεράσματα:

- Από τα θερμοδυναμικά δεδομένα μιας αντίδρασης, δε μπορεί να προβλεφθεί η εξέλιξη και η ταχύτητα της διάβρωσης στην πράξη.
- Ο ρόλος του διαβρωτικού περιβάλλοντος είναι καθοριστικός.

Η συστηματική κατάταξη των μετάλλων με ελαττούμενη προδιάθεση για οξείδωση είναι η γνωστή ηλεκτροχημική σειρά των στοιχείων. Όμως η κατάταξη αυτή έχει σχετική αξία στη μελέτη της διάβρωσης για δύο λόγους :

1. Αναφέρεται σε καθαρά μέταλλα και όχι σε κράματα που χρησιμοποιούνται στην πράξη
2. Το ηλεκτρολυτικό διάλυμα δεν αντιστοιχεί στο διαβρωτικό περιβάλλον στη πράξη. Αυτό οδήγησε στη διαμόρφωση πρακτικών πινάκων ηλεκτροχημικής συμπεριφοράς των μετάλλων και των κραμάτων τους.

Ένας τέτοιος πίνακας είναι αυτός που ακολουθεί (Πίν. 3.5). Στον πίνακα αυτό φαίνονται οι τιμές δυναμικών διαφόρων μετάλλων ως προς τρία διαφορετικά ηλεκτρόδια αναφοράς (υδρογόνου, χαλκού/θειικού χαλκού και καλομέλινα) για ταχύτητες ροής θαλασσινού νερού από 2.4 έως 4 m/sec και σε θερμοκρασιακή διακύμανση από 10 –27 °C.



Πιν 3.5: Γαλβανική σειρά στοιχείων και κραμάτων σε θαλασσινό νερό. [41]

### 3.5 Τρόποι αντιμετώπισης φαινομένων θαλάσσιας διάβρωσης<sup>18</sup>

Η εφαρμογή μεθόδων προστασίας από την διάβρωση επιβάλλεται τόσο για οικονομικούς λόγους όσο και για την ενίσχυση της ασφάλειας κατασκευών και εξοπλισμών και τη διαφύλαξη της σπατάλης των πλουτοπαραγωγικών πηγών. Λόγω των μηχανικών ιδιοτήτων του χάλυβα και της ευκολίας στην μορφοποίηση, βαφή, ανακύκλωση καθώς και το χαμηλό του κόστος, χρησιμοποιείται κατά κόρον στις κατασκευές και τον ναυπηγικό εξοπλισμό. Στη συνέχεια παρουσιάζονται οι μέθοδοι που χρησιμοποιούνται για την αντιμετώπιση της διάβρωσης:

[28]<sup>18</sup> <http://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/26976#page/8/mode/2up>

[40][https://www.chemeng.ntua.gr/dpms\\_ylika/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%94.%20%CE%A5%CF%86%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE.pdf](https://www.chemeng.ntua.gr/dpms_ylika/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%94.%20%CE%A5%CF%86%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE.pdf)



- 1) Επιλογή του κατάλληλου κατασκευαστικού υλικού.
- 2) Κατάλληλος σχεδιασμός της εγκατάστασης και χρησιμοποίηση αυτής με τέτοιο τρόπο ώστε να αποφεύγεται η διάβρωση.
- 3) Βελτίωση των συνθηκών του περιβάλλοντος.
- 4) Μέθοδοι μείωσης του δυναμικού διάβρωσης.
- 5) Μέθοδοι μείωσης της έντασης του ρεύματος διάβρωσης
- 6) Προσθήκη αναστολέων.
- 7) Συνδυασμός καθοδικής προστασίας και επιστρώματων.

### **Επιλογή υλικού**

Ο κυριότερος παράγοντας για την επιλογή ενός μετάλλου είναι η αντίστασή του στη διάβρωση. Η αντίσταση μπορεί να αυξηθεί σημαντικά με προσθήκες ή και διεργασίες που τροποποιούν την σύστασή του (κραματοποίηση ή καθαρισμός), την δομή του (θερμική κατεργασία), ή τις εσωτερικές του τάσεις (θερμική κατεργασία ή κατεργασία διαμόρφωσης εν ψυχρώ). Ο σκοπός των προσθηκών είναι να παθητικοποιήσουν ή διευκολύνουν την παθητικοποίηση του μετάλλου και να μειώσουν τις κρυσταλλικές του ατέλειες. Η διαδικασία καθαρισμού, καθώς και οι θερμικές κατεργασίες επιλέγονται βάσει της φύσης του υλικού. Στην παρούσα διπλωματική ο χάλυβας ο οποίος μελετάται είναι ο ΑΗ36 καθώς θεωρείται ο πιο κοινώς χρησιμοποιούμενος χάλυβας στα πλοία μεταφοράς φορτίου.

### **Σχεδιασμός εγκατάστασης**

Ο σωστός σχεδιασμός αποτελεί το πρώτο και σημαντικό βήμα για την προστασία και τον έλεγχο της διάβρωσης. Στην πράξη βέβαια, δεν μπορεί να είναι απόλυτος καθώς παρουσιάζεται η τάση να συνδυάζεται το κόστος και η διαθεσιμότητα των υλικών. Παρόλα αυτά η διάβρωση δεν πρέπει να αγνοείται.

### **Βήματα σχεδιασμού αντιδιαβρωτικής προστασίας**

Ο σχεδιασμός μπορεί να διαχωριστεί σε τέσσερα βήματα:

1. Καθορισμός της επιθυμητής λειτουργίας των επιμέρους τμημάτων της κατασκευής.
2. Αναγνώριση των συνθηκών περιβάλλοντος.
3. Επιλογή υλικού και κατασκευαστικές λεπτομέρειες.
4. Επιθεώρηση και συνεχής παρακολούθηση.

Στο πρώτο βήμα του σχεδιασμού καθορίζεται πως θα λειτουργεί το κάθε επιμέρους τμήμα της κατασκευής, δηλαδή πως θα πραγματοποιηθεί η επιθυμητή λειτουργία των τμημάτων της και ποιες θα είναι οι προτεραιότητες των ιδιοτήτων της.

Στο δεύτερο βήμα, προσδιορίζονται οι ιδιότητες του περιβάλλοντος καθορίζοντας τη χημική του σύσταση, τη θερμοκρασία, τη ταχύτητα ροής του διαβρωτικού μέσου καθώς και τις καταπονήσεις που υφίσταται σε συνήθεις συνθήκες λειτουργίας.

Στο τρίτο βήμα περιγράφεται μια επαναληπτική διαδικασία που σαν σκοπό έχει την επίτευξη των αντικειμενικών στόχων και των λειτουργιών που επιβάλλει ο σχεδιασμός. Έτσι, έχοντας

καθοριστεί τα υλικά που πρέπει να χρησιμοποιηθούν δίνονται συγκεκριμένες οδηγίες για τον συνδυασμό και την εφαρμογή της.

Τέλος, στο τέταρτο βήμα εξασφαλίζεται ότι η στρατηγική που ακολουθεί ο σχεδιασμός για την καταπολέμηση της διάβρωσης εφαρμόζεται στην κατασκευή και λειτουργεί αποτελεσματικά κατά τη διάρκεια ζωής του έργου.

### **Βελτίωση των συνθηκών περιβάλλοντος**

Ένας άλλος τρόπος που χρησιμοποιείται για την μείωση του ρυθμού διάβρωσης είναι η αλλαγή των περιβαλλοντικών συνθηκών. Τοπικές αλλαγές που είναι δυνατόν να επιφέρουμε στο μέσο είναι :

- 1) Μείωση της θερμοκρασίας
- 2) Μείωση της ταχύτητας ροής του διαβρωτικού μέσου
- 3) Απομάκρυνση ποσότητας του διαλυμένου στο διαβρωτικό μέσο οξυγόνου
- 4) Αλλαγή της συγκέντρωσης διαβρωτικού μέσου

### **Επιβραδυντές**

Οι επιβραδυντές είναι χημικές ουσίες ή συνδυασμός συστατικών τα οποία με την παρουσία τους αποτρέπουν ή απλά επιβραδύνουν την δράση του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Η χρήση των επιβραδυντών σε πρακτικές εφαρμογές θα πρέπει να γίνεται με ιδιαίτερη προσοχή καθώς αν και τα συστατικά αυτά σε ορισμένους τύπους συνθηκών εμποδίζουν την διάβρωση σε ορισμένους τύπους μετάλλων, είναι δυνατόν να προκαλέσουν αντίθετα αποτελέσματα για άλλους τύπους μετάλλων ή κραμάτων. Οι επιβραδυντές μπορεί να έχουν οργανική ή ανόργανη φύση ενώ στο σύνολο τους είναι σχεδόν υδατοδιαλυτοί. Ανάλογα με τον τρόπο δράσης του ανασταλτικού συστατικού, ως προς την διάβρωση, οι αναστολείς είναι σκόπιμο να καταταθούν σε :

- 1) Ανοδικούς-Καθοδικούς
- 2) Ωμικούς-Μέσω καθίζησης
- 3) Υδατικούς

### **Επιστρώματα**

Η χρήση επιστρώσεων είναι η πιο ευρέως χρησιμοποιούμενη μέθοδος για την αντιμετώπιση της διάβρωσης. Συναντώνται σε διάφορες εφαρμογές αναλόγως των ιδιομορφιών και των απαιτήσεων που θέτει ο σχεδιασμός. Διακρίνονται σε οργανικές επιστρώσεις, μεταλλικές ή αμέταλλες επιστρώσεις. Τέτοια υλικά μπορούν να χρησιμοποιούνται και σε συνδυασμό με τοποθέτησή τους σε διαδοχικά στρώματα ώστε να καλύπτεται η απαίτηση σε αντιδιαβρωτική προστασία.

Οι επιστρώσεις που χρησιμοποιούνται μπορεί να παρέχουν την προστασία στο μεταλλικό υπόστρωμα μέσω τριών βασικών μηχανισμών:

- 1) Προστασία με εξωτερική επικάλυψη
- 2) Χημική αναστολή
- 3) Γαλβανική προστασία (Θυσιαστική προστασία)

Η προστασία με εξωτερική επικάλυψη επιτυγχάνεται με την πλήρη απομόνωση του μεταλλικού υποστρώματος από τις συνθήκες του περιβάλλοντος.

Η χημική αναστολή γίνεται δυνατή με την χρήση συγκεκριμένων συστατικών στην βαφή.

Η θυσιαστική προστασία μπορεί να επιτευχθεί όταν ως επίστρωση χρησιμοποιείται ένα πιο ενεργό μέταλλο (ηλεκτραρνητικότερο) με αποτέλεσμα να προστατεύεται η μεταλλική επιφάνεια που έχει στο δημιουργούμενο γαλβανικό ζεύγος τον ρόλο της καθόδου.

Στην παρούσα διπλωματική κρίνεται σκόπιμη η πιο αναλυτική αναφορά στη μέθοδο της καθοδικής προστασίας, η οποία χρησιμοποιείται σε μεγάλο βαθμό στα πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου για την προστασία χαλύβων, συνεπώς και για το ναυπηγικό χάλυβα που μελετάμε (ΑΗ36).

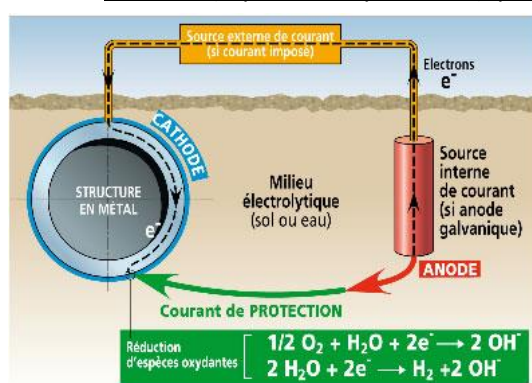
### 3.6 Καθοδική προστασία<sup>19</sup>

#### Γενική περιγραφή καθοδικής προστασίας

Η γενική αρχή της καθοδικής προστασίας βασίζεται όχι μόνο στην ελάττωση αλλά και την αντιστροφή του δυναμικού διάβρωσης που αναπτύσσεται μεταξύ των μεταλλικών επιφανειών υπό την επίδραση του διαβρωτικού περιβάλλοντος που αυτές βρίσκονται. Έτσι, η εγκατάσταση η οποία θέλουμε να προστατευτεί έναντι διάβρωσης φορτίζεται αρνητικά, με αποτέλεσμα ενώ αρχικά συμπεριφερόταν ως άνοδος γαλβανικού στοιχείου στη συνέχεια να συμπεριφέρεται ως κάθοδος ηλεκτρολυτικού κελιού. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως πλέον η εγκατάστασή μας δρα ως αναγωγικός και όχι οξειδωτικός πόλος (έτσι συμπεριφερόταν πριν φορτιστεί αρνητικά) αντιστρέφοντας δηλαδή τη «διαβρωτική της συμπεριφορά».

Όπως αναφέρθηκε, μείζονα ρόλο στην καθοδική προστασία παίζει η εφαρμογή συνεχούς ηλεκτρικού ρεύματος στην προστατευόμενη εγκατάσταση. Συνεπώς, υπάρχουν δυο βασικοί τρόποι για να εφαρμοστεί η μέθοδος της καθοδικής προστασίας και είναι οι εξής:

#### 1. Καθοδική προστασία με θυσιαζόμενα ηλεκτρόδια (θυσιαζόμενες ανόδους)



Σχ.3.6 Καθοδική προστασία από θυσιαζόμενα ηλεκτρόδια (Μοντέλο δράσης καθοδικής προστασίας). [33]

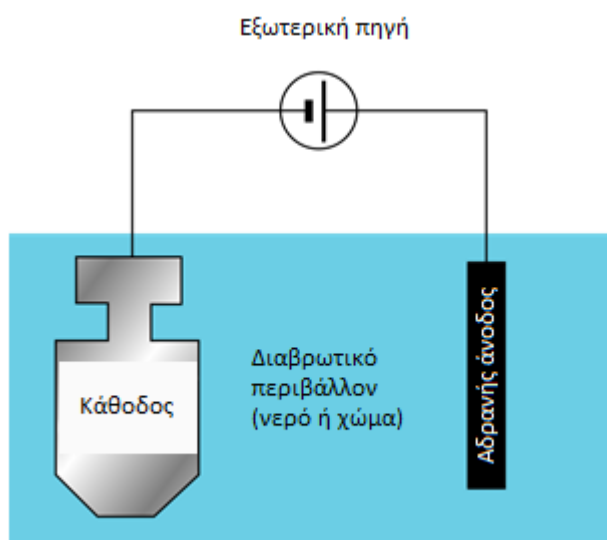
<sup>19</sup> [30]"Διάβρωση και προστασία υλικών "Σύγγραμμα, Βασιλείου Π., Σκουλικίδης Θ., 2007, Συμειών, ISBN: 978-960-7888-85-3

[31]<http://cathodicprotection.gr/Cathodic-Protection.php>

[32][https://en.wikipedia.org/wiki/Cathodic\\_protection](https://en.wikipedia.org/wiki/Cathodic_protection)

Από το Σχ.3.6 παρατηρούμε ότι τόσο η άνοδος όσο και η κάθοδος(εγκατάσταση) βρίσκονται εντός διαβρωτικού περιβάλλοντος (απαραίτητη προϋπόθεση για την εφαρμογή καθοδικής προστασίας). Προφανώς το θυσιαζόμενο μέταλλο είναι ανοδικότερο από το μέταλλο που αποτελείται η εγκατάσταση (εδώ πρόκειται για το ναυπηγικό χάλυβα ΑΗ36 από τον οποίο είναι κατασκευασμένη η γάστρα στα περισσότερα πλοία μεταφοράς ξηρού φορτίου τα οποία και μελετάμε) ώστε να υπάρξει φυσική ροή ηλεκτρονίων προς την εγκατάσταση την οποία θέλουμε να προστατέψουμε. Παρατηρούμε ότι η σύνδεση μεταξύ των μεταλλικών αυτών μερών γίνεται με εξωτερικά μονωμένους αγωγούς και με παρεμβολή αντίστασης και όχι άμεσα. Καθώς ηλεκτρόνια μεταφέρονται λοιπόν από το ανοδικότερο μέταλλο (θυσιαζόμενη άνοδος) προς την εγκατάσταση, αυτή μετατρέπεται σε αρνητικό πόλο ηλεκτρολυτικού κελιού και πραγματοποιείται αναγωγή αντί για οξείδωση. Έτσι η εγκατάσταση προστατεύεται ενώ η άνοδος «θυσιάζεται» εξαιτίας της απώλειας ηλεκτρονίων και της δημιουργίας ιόντων μετάλλου στην επιφάνειά της.

## 2. Καθοδική προστασία με εξωτερική ηλεκτρική τάση



Σχ.3.6 Καθοδική προστασία από εξωτερική ηλ.τάση (Μοντέλο δράσης καθοδικής προστασίας).[33]

Στο Σχ.3.6 παρατηρούμε ότι η καθοδική προστασία επιτυγχάνεται με χρήση εξωτερικής ηλεκτρικής πηγής συνεχούς ρεύματος. Η πηγή αυτή μπορεί να είναι συσσωρευτής ή ανορθωτής. Ο αρνητικός πόλος της πηγής συνδέεται με τη βοήθεια μονωμένων αγωγών με την εγκατάσταση ενώ ο θετικός πόλος συνδέεται με αδρανή παράλληλα ηλεκτρόδια και όλα αυτά βρίσκονται εντός του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Στην προκειμένη περίπτωση ως διαβρωτικό περιβάλλον ορίζεται το θαλάσσιο περιβάλλον και το διαβρωτικό μέσο προφανώς είναι τόσο το θαλασσινό νερό καθώς και το οξυγόνο της ατμόσφαιρας. Έτσι τα ηλεκτρόνια μεταφέρονται από την πηγή στην εγκατάσταση και τη μετατρέπουν σε αρνητικό πόλο με αναγωγική συμπεριφορά, ενώ πριν την εφαρμογή της τάσης η εγκατάσταση είχε οξειδωτική συμπεριφορά.

Τέλος, τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν ξανά στο θετικό πόλο της εγκατάστασης μέσω των βοηθητικών ανόδων με συνέπεια και στην περίπτωση αυτή το δυναμικό διάβρωσης να ελαττώνεται ή/και να αντιστρέφεται.

### 3.7 Προβλήματα καθοδικής προστασίας<sup>20</sup>

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, βασική προϋπόθεση για την εφαρμογή της καθοδικής προστασίας αποτελεί η φόρτιση της ηλεκτρικής εγκατάστασης που θέλουμε να προστατευθεί. Βασικό μειονέκτημα είτε της μεθόδου των θυσιαζόμενων ηλεκτροδίων είτε της εφαρμογής τάσης από εξωτερική πηγή συνεχούς ρεύματος είναι ότι τόσο η εγκατάσταση όσο και οι θυσιαζόμενες ή αδρανείς άνοδοι πρέπει να βρίσκονται εντός του ίδιου διαβρωτικού περιβάλλοντος, το οποίο πρέπει να παραμένει χρονικά σταθερό (οι χημικές του ιδιότητες πρέπει να παραμένουν αμετάβλητες με το χρόνο όσο το δυνατόν περισσότερο). Στο σημείο αυτό αξίζει να τονιστεί ότι η τάση καθοδικής προστασίας που εφαρμόζεται στην υπό προστασία εγκατάσταση είναι συνάρτηση του δυναμικού διάβρωσης το οποίο με τη σειρά του επηρεάζεται άμεσα από τις συνθήκες του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Συνεπώς αν η μέθοδος αυτή εφαρμοστεί με λαθεμένες συνθήκες μπορεί να οδηγήσει είτε σε υπερπροστασία είτε σε υποπροστασία της εγκατάστασης με αποτέλεσμα τη συνεχή διάβρωσή της.

Αυτό πρακτικά σημαίνει ότι αύξηση της καθοδικότητας της εγκατάστασης πάνω από ορισμένο όριο (υπερπροστασία) μεγαλώνει εξαιρετικά την ταχύτητα διάβρωσης οδηγώντας τόσο σε εσωτερική όσο και εξωτερική αλλοίωση των μηχανικών ιδιοτήτων της εγκατάστασης (αύξηση ανομοιογένειας επιφάνειας, συγκέντρωση υδροξονίων οδηγεί σε ψαθυροποίηση και θραύση, έκλυση υδρογόνου, σαπωνοποίηση αντιρρυπαντικών και αντιδιαβρωτικών χρωμάτων λόγω έκλυσης υδρογόνου κλπ).

Επιπρόσθετα, μπορούν να αναφερθούν επιγραμματικά τα κατωτέρω προβλήματα λόγω εφαρμογής καθοδικής προστασίας σε εγκαταστάσεις:

- i. Προβλήματα λόγω δυσκολίας εκλογής των σωστών ορίων τιμών της καθοδικής τάσης και σωστής εφαρμογής της.
- ii. Προβλήματα λόγω της διακύμανσης των συνθηκών και του διαβρωτικού περιβάλλοντος που αλλάζει με το χρόνο τα όρια της σωστής επιβαλλόμενης τάσης καθοδικής προστασίας (λόγω διακύμανσης του δυναμικού διάβρωσης).

Όσον αφορά το 2<sup>ο</sup> πρόβλημα, στην περίπτωση καθοδικής προστασίας με θυσιαζόμενα ηλεκτρόδια το πρόβλημα της διακύμανσης των συνθηκών του διαβρωτικού περιβάλλοντος άρα και του δυναμικού διάβρωσης δυστυχώς δεν μπορεί να εξαλειφθεί με αναπροσαρμογή της εφαρμοζόμενης τάσης καθοδικής προστασίας. Για αυτό αν χρησιμοποιούνται θυσιαζόμενες άνοδοι, αυτές πρέπει να αντικαθίστανται αρκετά συχνά, πράγμα που δεν κρίνεται ιδιαίτερα αποτελεσματικό και οικονομικό. Αντίθετα, αυτό μπορεί να αντιμετωπιστεί αν εφαρμόζεται η μέθοδος καθοδικής προστασίας με εξωτερική τάση.

Ακόμα, μειονέκτημα της μεθόδου είναι ότι πρέπει πρώτα να έχει εφαρμοστεί λεπτομερειακή εργαστηριακή, προ-ημιβιομηχανική διερεύνηση για τον καθορισμό των ορίων καθοδικής τάσης (αντιμετώπιση του 1<sup>ου</sup> προβλήματος). Η διαδικασία αυτή κρίνεται ιδιαίτερα δαπανηρή

<sup>20</sup> [30] Διάβρωση και προστασία υλικών "Σύγγραμμα, Βασιλείου Π., Σκουλικίδης Θ., 2007, Συμίων, ISBN: 978-960-7888-85-3

[40] [https://www.chemeng.ntua.gr/dpms\\_ylika/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%94.%20%CE%A5%CF%86%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE.pdf](https://www.chemeng.ntua.gr/dpms_ylika/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%94.%20%CE%A5%CF%86%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE.pdf)

καθώς για μεγάλες διακυμάνσεις του διαβρωτικού περιβάλλοντος, η καταλληλότητα της καθοδικής τάσης επιτυγχάνεται μόνο με χρήση δαπανηρών δυναμοστατών για το διαρκή έλεγχο των συνθηκών.

Τέλος, ένα εξίσου σημαντικό πρόβλημα της μεθόδου είναι ότι προκειμένου να εφαρμοστεί, θα πρέπει τόσο η εγκατάσταση όσο και οι άνοδοι να βρίσκονται εντός του ίδιου διαβρωτικού περιβάλλοντος το οποίο πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι αγωγίμο.

### 3.8 Τρόποι αντιμετώπισης προβλημάτων<sup>21</sup>

Όπως αναφέρθηκε, το 1<sup>ο</sup> πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί μόνο με λεπτομερειακό εργαστηριακό, προ-ημιβιομηχανικό έλεγχο. Πρέπει να αποφεύγεται σε κάθε περίπτωση η εφαρμογή της ίδιας καθοδικής τάσης προστασίας που εφαρμόστηκε σε μια ανάλογη περίπτωση από περιοχή σε περιοχή λόγω της αλλαγής των περιβαλλοντικών συνθηκών και των συχνών μεταβολών του διαβρωτικού περιβάλλοντος και της αγωγιμότητάς του.

Το 2<sup>ο</sup> πρόβλημα μπορεί να αντιμετωπιστεί είτε με συχνή αλλαγή θυσιαζόμενων ανόδων, τεχνική που είναι οικονομικά επιβλαβής, είτε με χρήση δυναμοστατών αρκεί η διακύμανση των συνθηκών του περιβάλλοντος να μην είναι πολύ μεγάλη. Ο δυναμοστάτης μπορεί να ανιχνεύει αλλαγές στο διαβρωτικό περιβάλλον μέσω των αλλαγών του δυναμικού διάβρωσης και να επιβάλλει τη σωστή καθοδική τάση.

## 4 Διάβρωση με αλατονέφωση<sup>22</sup>

Η χρήση της μεθόδου της αλατονέφωσης εφαρμόζεται για περισσότερα από 100 χρόνια για τον έλεγχο της επιδεκτικότητας στη διάβρωση μεταλλικών και μη μεταλλικών υλικών, καθώς και για τον έλεγχο του βαθμού προστασίας που προσφέρουν οι επικαλύψεις. Στις περισσότερες περιπτώσεις οι δοκιμές εφαρμόζονται για τη σύγκριση της συμπεριφοράς μετάλλων και επικαλύψεων κατά την εφαρμογή συγκεκριμένου προτύπου. Στην επιστημονική κοινότητα γίνονται εκτεταμένες συζητήσεις σχετικά με την αξία των δοκιμών αυτών. Σε κάθε περίπτωση, είναι απαραίτητο να εφαρμόζεται με ακρίβεια η διαδικασία τόσο της προετοιμασίας των δοκιμών, του πειράματος, αλλά και της αποτίμησης των αποτελεσμάτων. Τότε είναι δυνατόν να ληφθούν μετρήσεις οι οποίες αντιπροσωπεύουν με ακρίβεια την εφαρμογή προτυποποιημένου «ποσού διάβρωσης» για τη σύγκριση της σχετικής συμπεριφοράς των υλικών ή και των επιστρωμάτων.

Για τη διεξαγωγή δοκιμών διάβρωσης σε επικαλύψεις προστασίας του χάλυβα, προτάθηκε για πρώτη φορά δοκιμή με ουδέτερο διάλυμα αλατονέφωσης στο πλαίσιο του προτύπου

---

<sup>21</sup> [30] Διάβρωση και προστασία υλικών "Σύγγραμμα, Βασιλείου Π., Σκουλικίδης Θ., 2007, Συμείων, ISBN: 978-960-7888-85-3

[40] [https://www.chemeng.ntua.gr/dpms\\_ylika/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%94.%20%CE%A5%CF%86%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE.pdf](https://www.chemeng.ntua.gr/dpms_ylika/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%94.%20%CE%A5%CF%86%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE.pdf)

<sup>22</sup> [41] [https://en.wikipedia.org/wiki/Salt\\_spray\\_test](https://en.wikipedia.org/wiki/Salt_spray_test)

[42] [http://library.tee.gr/digital/techr/2006/techr\\_2006\\_3\\_pistofidis.pdf](http://library.tee.gr/digital/techr/2006/techr_2006_3_pistofidis.pdf)

[43] <http://www.galvanizeit.com/uploads/ASTM-B-117-yr11.pdf>

ASTM B117. Πολλές βελτιώσεις και αναθεωρήσεις έχουν γίνει τα τελευταία χρόνια, τόσο ως προς τις δοκιμές αλατονέφωσης όσο και ως προς τους θαλάμους που χρησιμοποιούνται και τις διατάξεις. Η δοκιμή της αλατονέφωσης χρησιμοποιείται ευρέως ως εργαλείο για την εκτίμηση του πάχους και του πορώδους μεταλλικών και μη μεταλλικών προστατευτικών επικαλύψεων, με μεγάλη επιτυχία. Η αλατονέφωση χρησιμοποιείται, επίσης, ως εργαστηριακή δοκιμή επιταχυνόμενης διάβρωσης για την προσομοίωση της επίδρασης της θαλάσσιας ατμόσφαιρας σε διάφορα μέταλλα, με ή χωρίς επικαλύψεις. Οι πιο κοινά αποδεκτές μέθοδοι εφαρμογής δοκιμών αλατονέφωσης περιγράφονται με ακρίβεια στα πρότυπα:

- ASTM B117 “Standard method of salt spray (FOG) testing”
- B368 “Standard test method for copper-accelerated acetic- salt spray (FOG) testing”
- ASTM G 85 “Standard practice for modified salt spray (FOG) testing”

Σημειώνεται, ότι υπάρχουν δοκιμές διάβρωσης στις οποίες εφαρμόζονται συνθήκες υψηλής υγρασίας, όπου απιονισμένο νερό χρησιμοποιείται ως συστατικό της διάβρωσης και στις οποίες δεν περιλαμβάνεται άλας ως στοιχείο διάβρωσης (ASTM D1735, ASTM D2247, ASTM G 60). Οι δοκιμές αλατονέφωσης διακρίνονται σε δύο κατηγορίες :

- Δοκιμές σε «στατικές» συνθήκες
- Δοκιμές σε «κυκλικές» συνθήκες

Στις στατικές δοκιμές οι συνθήκες και η ατμόσφαιρα παραμένουν σταθερές σε όλη τη διάρκεια της δοκιμής: θερμοκρασία, πυκνότητα νέφους, pH του ηλεκτρολυτικού διαλύματος. Οι δοκιμές μπορεί να διαρκούν 24 ώρες την ημέρα, 7 ημέρες την εβδομάδα για όλο το διάστημα έκθεσης. Στη συνέχεια τα δοκίμια απομακρύνονται από το θάλαμο για καθαρισμό, μελέτη και ανάλυση. Η σύγχρονη έρευνα επικεντρώνεται στο σχεδιασμό δοκιμών που προσομοιάζουν περισσότερο ρεαλιστικά την πραγματική έκθεση στο περιβάλλον και τις συνθήκες λειτουργίας. Με γνώμονα αυτό σχεδιάζονται νέες κυκλικές δοκιμές. Κατά τις κυκλικές δοκιμές, τα δοκίμια υποβάλλονται σε επαναλαμβανόμενη σειρά βημάτων συγκεκριμένου χρόνου, διαφορετικής ατμόσφαιρας, έως ότου ολοκληρωθεί ο προκαθορισμένος χρόνος έκθεσης ή αριθμός κύκλων. Ένα πλήρες σύνολο βημάτων συνιστά έναν κύκλο.

Τα βήματα αυτά περιλαμβάνουν:

- Διαφορετικές θερμοκρασίες
- Μεταβαλλόμενα επίπεδα σχετικής υγρασίας RH (20-100%)
- Διάφορα διαβρωτικά συστατικά (ρυπαντές, ηλεκτρολύτες)

Στην παρούσα Διπλωματική Εργασία η μέθοδος αλατονέφωσης που χρησιμοποιείται είναι κατά κύριο λόγο σε στατικές συνθήκες ωστόσο τα δοκίμια εξέρχονται από το θάλαμο σε διαφορετικά χρονικά διαστήματα. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα, τα προϊόντα διάβρωσης των δοκιμών να είναι διαφορετικά και να εξαρτώνται από το χρόνο έκθεσής τους στο θάλαμο αλατονέφωσης. Με τον τρόπο αυτό εκμεταλλευόμαστε τα πλεονεκτήματα της διάβρωσης με αλατονέφωση σε στατικές συνθήκες, καθώς πρόκειται για μια διαδικασία πιο απλή με μικρότερη πιθανότητα εισαγωγής σφαλμάτων στα πειραματικά αποτελέσματα, ενώ ταυτόχρονα στην πειραματική διαδικασία υπεισέρχονται και ορισμένα από τα πλεονεκτήματα της διάβρωσης σε κυκλικές συνθήκες (ποικιλία αποτελεσμάτων για δοκίμια που εκτίθενται για διαφορετικές χρονικές περιόδους).

### Δοκιμές σε «στατικές» συνθήκες

Το πρότυπο ASTM B117 περιγράφει στατικές συνθήκες δοκιμής αλατονέφωσης. Η διαδικασία του προτύπου αυτού καθορίζει διαρκή έκθεση σε αλατονέφωση 5% σε θερμοκρασία 35°C και πίεση 1bar. Στα τελευταία 70 χρόνια έχουν πραγματοποιηθεί πολλές τροποποιήσεις και βελτιώσεις στο πρότυπο ASTM B 117. Ωστόσο παρά τις βελτιώσεις αποτελεί κοινό τόπο ότι τα αποτελέσματα δοκιμών αλατονέφωσης σε στατικές συνθήκες δεν ανταποκρίνονται απολύτως στα φαινόμενα διάβρωσης που παρατηρούνται στο περιβάλλον λειτουργίας.

### Δοκιμές σε «κυκλικές» συνθήκες

Οι δοκιμές κυκλικής διάβρωσης θεωρούνται περισσότερο ρεαλιστικές. Κατά τις κυκλικές δοκιμές προκαλείται διάβρωση των υλικών κατά τρόπο που ανταποκρίνεται καλύτερα στην πραγματικότητα από τους συμβατικούς τρόπους έκθεσης. Δεδομένου ότι στο περιβάλλον λειτουργίας ενός υλικού περιλαμβάνονται συνήθως υγρές και ξηρές συνθήκες, στόχος είναι οι εργαστηριακές δοκιμές να προσομοιάζουν τις φυσικές κυκλικές συνθήκες. Τα αποτελέσματα της σύγχρονης έρευνας αποδεικνύουν ότι στις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης ο σχετικός ρυθμός διάβρωσης, η δομή και η μορφολογία που προκύπτει προσομοιάζουν σε ικανοποιητικό βαθμό το περιβάλλον λειτουργίας. Κατά τις κυκλικές δοκιμές διάβρωσης, τα δοκίμια εκτίθενται σε διαφορετικό περιβάλλον σε επαναλαμβανόμενο κύκλο. Οι απλοί κύκλοι αποτελούνται από επαναλαμβανόμενες συνθήκες αλατονέφωσης και ξήρανσης. Οι πιο σύγχρονες αυτόματες μέθοδοι περιλαμβάνουν κύκλους πολλών βημάτων, όπως, υγρασία ή συμπίκνωση μαζί με αλατονέφωση και ξηρανση.

## 4.1 Διάταξη αλατονέφωσης

Η συσκευή αλατονέφωσης είναι μοντέλο 606/400-I, μονού θαλάμου και έχει κατασκευαστεί από την εταιρεία Erichsen. Στην Εικόνα 4.4 φαίνεται η εν λόγω διάταξη που αποτελείται από διαφορετικές συνεργαζόμενες συσκευές.

Τα κυριότερα μέλη του θαλάμου είναι τα εξής:

- Μία μηχανή με αεροσυμπιεστή και αεριοφυλάκιο που εξασφαλίζει την παροχή αέρα υψηλής πίεσης, καταναλώνοντας ηλεκτρικό ρεύμα.
- Η κεντρική μονάδα με τη δεξαμενή
- Τα πλήκτρα ελέγχου τα οποία συνδέουν τα διάφορα μέρη και ρυθμίζουν τις παραμέτρους λειτουργίας.

Στη δεξαμενή τοποθετείται το διάλυμα νερού χλωριούχου νατρίου. Η κεντρική μονάδα τροφοδοτεί το θάλαμο, όπου τοποθετούνται με συγκεκριμένο τρόπο τα προς διάβρωση δοκίμια. Σκοπός του θαλάμου είναι να διατηρεί σταθερές συνθήκες διάβρωσης. Η κεντρική μονάδα τροφοδοτεί πεπιεσμένο αέρα και διάλυμα χλωριούχου νατρίου σε ακροφύσιο που βρίσκεται εντός του θαλάμου, σε αναλογία που ρυθμίζει ο χειριστής. Η παροχή του νέφους γίνεται με συνεχή τρόπο ώστε να υπάρχει συνεχόμενη ροή γύρω από τα δοκίμια. Για το λόγο αυτό είναι απαραίτητο να εκτονώνεται μέρος του νέφους μέσω ελεύθερου αγωγού. Επίσης για να μην υπάρχει υπερχειλίση αλατόνευρου, ο θάλαμος διαθέτει αγωγό απομάκρυνσης της ποσότητας που λιμνάζει στο κάτω μέρος του.





Εικόνα 4.1:  
Πειραματική  
διάταξη  
αλατονέφωσης.

## 5. Λουτρό εμβάπτισης NaCl

Η διάταξη αποτελείται από δύο δεξαμενές μέσα στις οποίες τοποθετούνται αυτοσχέδιες διατάξεις που περιέχουν τα χαλύβδινα δοκίμια τα οποία προορίζονται για μελέτη της διακύμανσης των μηχανικών τους ιδιοτήτων καθώς και η εξέλιξη του φαινομένου διάβρωσης πάνω σε αυτά. Η εξέλιξη του φαινομένου διάβρωσης των δοκιμίων αυτών θα γίνει μέσω συγκριτικών καμπυλών απώλειας μάζας – χρόνου έκθεσης. Επιπρόσθετα, πραγματοποιείται πλήρωση των αυτοσχέδιων διατάξεων στις οποίες έχουν τοποθετηθεί τα δοκίμια με διαβρωτικό διάλυμα περιεκτικότητας 3.5% κ.β. NaCl. Τα δοκίμια πρέπει να είναι πλήρως βυθισμένα σε αυτό. Ο υπόλοιπος χώρος εντός των δεξαμενών γεμίζει με απιονισμένο νερό. Οι δεξαμενές διαθέτουν επιπλέον θερμοστάτη συνδεδεμένο με ειδικό κυκλοφορητή που διοχετεύει θερμό απιονισμένο νερό σε κλειστό κύκλωμα γυάλινων σωλήνων στο κάτω μέρος των δεξαμενών ώστε να είναι πάντα καλυμμένο από το απιονισμένο νερό. Κατ' αυτόν τον τρόπο η θερμοκρασία διατηρείται σταθερή στους 30°C εντός της δεξαμενής και των λεκανών. Επειδή όμως η θερμοκρασία περιβάλλοντος είναι μικρότερη από τους 30°C, σημαντική ποσότητα νερού εξατμίζεται από τις αυτοσχέδιες διατάξεις και τις δεξαμενές. Για να αποφευχθεί όσο το δυνατόν περισσότερο η εξάτμιση από τις διατάξεις, που μας ενδιαφέρουν αφού εκεί μέσα βρίσκεται το διάλυμα NaCl, τοποθετούνται διάφανες μεμβράνες ώστε το νερό που εξατμίζεται να μη διαφεύγει εκτός και να υγροποιείται εκ νέου. Με τον τρόπο αυτό διατηρούμε όσο το δυνατόν σταθερές τις διαβρωτικές συνθήκες, δηλαδή την περιεκτικότητα του διαλύτη σε NaCl (3.5% κ.β) . Φυσικά, σε τακτά χρονικά διαστήματα γίνεται έλεγχος της στάθμης σε σχέση με μια στάθμη αναφοράς ώστε να γίνονται συμπληρώσεις απιονισμένου νερού και να διατηρείται η κατά βάρος σύσταση του διαβρωτικού περιβάλλοντος. Το νερό εκτός των λεκανών ελέγχεται επίσης περιοδικά και συμπληρώνεται. Κατ' αυτόν τον τρόπο το περιβάλλον διατηρείται όσο το δυνατό σταθερότερο κατά τη διάρκεια της διαδικασίας διάβρωσης.



Εικόνα 5.1: Λουτρό εμβάπτισης εργαστηρίου Χημ.Μηχ.

Αξίζει να επισημανθεί ότι τα δοκίμια τα οποία εκτέθηκαν σε διαβρωτικές συνθήκες προσομοίωσης θαλάσσιου περιβάλλοντος σε λουτρό εμβάπτισης ήταν 18 εκ των οποίων τα μισά ήταν κανονικά βαμμένα με αστάρι ενώ τα υπόλοιπα 9 είχαν προηγουμένως ψηγματοβοληθεί και επομένως δεν διέθεταν αστάρι. Τα δοκίμια χωρίς αστάρι μονώθηκαν κατάλληλα περιμετρικά τόσο με ακρυλικό υλικό όσο και με κερί ώστε να μην υπάρχει διάβρωση στην περιοχή του λαιμού.

Επίσης, εφόσον γνωρίζουμε πως το αστάρι το οποίο επικαλύπτει τα δοκίμια έχει σαν συνδετικό υλικό την αλκυδική ρητίνη και βάση το φωσφορικό ψευδάργυρο, μας οδήγησε στο να διαχωρίσουμε τα δοκίμια μας σε διαφορετικές λεκάνες ώστε να μην υπάρχει ανάμιξη μεταξύ τους. Σε αντίθετη περίπτωση η διάβρωση που θα προκαλούνταν στα δοκίμια χωρίς αστάρι από το ίδιο το αστάρι που θα επέπλεε στο διάλυμα NaCl θα επέφερε περαιτέρω και ανεπιθύμητη διάβρωση στα ψηγματοβολημένα δοκίμια.



Εικόνα 5.2: Διαχωρισμός δοκιμίων με αστάρι (δεξιά) και χωρίς αστάρι (αριστερά)

## 6. Μέθοδοι εξέτασης της μικροδομής χάλυβα

### 6.1 Μελέτη μικροδομής με οπτικό μικροσκόπιο<sup>23</sup>

Η διαδικασία αυτή έγινε για να παρατηρηθούν οι επιφάνειες των τεμαχίων που έχουν κοπεί σε διαφορετικές θέσεις, ώστε να φωτογραφηθούν και να συγκριθούν με κάποια πρότυπα φωτογραφιών και φτάσουμε σε κάποια συμπεράσματα τα οποία θα αναφερθούν στα παρακάτω κεφάλαια.

Ως οπτικά ή φωτονικά αναφέρονται τα μικροσκόπια εκείνα που χρησιμοποιούν το τμήμα του ορατού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (380 – 760 nm). Η μεγέθυνση ενός οπτικού μικροσκοπίου δίνεται από τη σχέση:

$$M = m_o \cdot m_e \quad (1)$$

όπου  $m_e$  και  $m_o$  είναι οι εγκάρσιες μεγεθύνσεις των δυο φακών, δηλαδή  $m_e$  του προσοφθάλμιου (eyepiece) και  $m_o$  του αντικειμενικού (objective) (εικόνα 6.1, πειραματική διάταξη).

Η συνάρτηση (2) λέγεται αριθμητικό άνοιγμα, NA, (Numerical Aperture) του φακού και εξαρτάται αποκλειστικά από την κατασκευή του φακού (εικόνα 6.1):

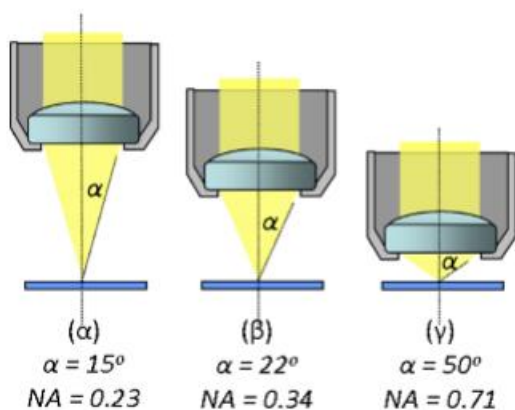
$$NA = n \cdot \sin \alpha \quad (2)$$

όπου  $n$  είναι ο δείκτης διάθλασης του μέσου μεταξύ παρασκευάσματος και φακού και  $\alpha$  το μισό της γωνίας του φωτεινού κώνου που δέχεται ο φακός.

Η διακριτική ικανότητα  $D_{min}$  είναι η ελάχιστη απόσταση δύο σημείων των οποίων τα είδωλα είναι ευδιάκριτα και περιορίζεται από τη σκέδαση του φωτός. Η διακριτική ικανότητα ενός οπτικού συστήματος δεν εξαρτάται από την μεγέθυνση του αλλά από το μήκος κύματος του φωτός  $\lambda$  (της ακτινοβολίας) και το αριθμητικό άνοιγμα, NA, ως:

$$D_{min} = 0,61 \lambda / NA \quad (3)$$

όπου 0,61 είναι ένας σταθερός αριθμός.

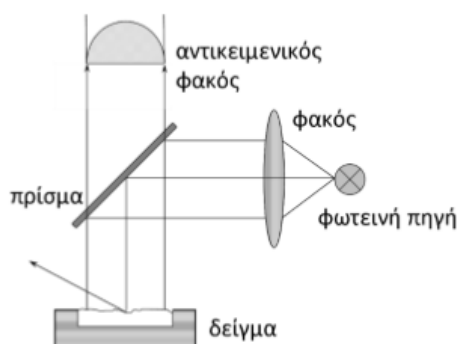


Εικόνα 6.1: Το αριθμητικό άνοιγμα NA (Numerical Aperture) ενός οπτικού συστήματος σε σχέση με το  $\alpha$ , το μισό της γωνίας του φωτεινού κώνου που δέχεται ο φακός. Ο δείκτης διάθλασης είναι  $n = 1$ . [44]

[44]<sup>23</sup> <https://www.aua.gr/fasseas/optika%20mikroskopia.htm>

Η σχέση (3) εκφράζει πως για να βελτιώσουμε τη διακριτική ικανότητα θα πρέπει να ελαττώσουμε το  $\lambda$  και να αυξήσουμε το  $NA$ . Επειδή όμως οι οπτικοί (γυάλινοι) φακοί είναι σχεδόν τέλειοι, από πλευράς ποιότητας κατασκευής, το  $NA$  δεν μπορεί να αυξηθεί άλλο. Στην πράξη τα μικροσκόπια που συναντάμε συνήθως σε ένα εργαστήριο έχουν φακούς που στη καλύτερη περίπτωση έχουν αριθμητικό άνοιγμα  $NA = 1,4$ .

Εφ' όσον λοιπόν το φως που χρησιμοποιούν τα οπτικά μικροσκόπια έχει μέσο μήκος κύματος  $\lambda = 500 \text{ nm}$  και το αριθμητικό άνοιγμα  $NA$  ενός πολύ καλού φακού είναι το πολύ 1,4, τότε η διακριτική ικανότητα του οπτικού μικροσκοπίου δεν μπορεί να ξεπεράσει τα  $220 \text{ nm}$ .



Εικόνα 6.2: Οπτικό μικροσκόπιο φωτεινού πεδίου με ανακλώμενη δέσμη. [44]

Στην παρούσα άσκηση, η μεταλλογραφική παρατήρηση δειγμάτων γίνεται με ένα οπτικό μικροσκόπιο φωτεινού πεδίου με ανακλώμενη δέσμη. Η εικόνα 6.2 δείχνει τη διαδρομή των φωτεινών ακτινών.

## 6.2 Είδη Φασματοσκοπίας<sup>24</sup>

Υπάρχουν τρεις κατηγορίες φασματοσκοπίας: Απορρόφησης, εκπομπής και σκέδασης.

Ανάλογα με την ακτινοβολία παρατήρησης και τον τρόπο μέτρησης, υπάρχουν οι εξής μέθοδοι φασματοσκοπίας:

- Φθορισμού
- Ακτίνων Χ (XRD)
- Φλογοφωτομετρία
- Ατομικής Εκπομπής
- Ατομικής Απορρόφησης
- Υπέρυθρη
- Πυρηνική μαγνητική φασματοσκοπία συντονισμού και άλλες.

[45]<sup>24</sup> [http://www.physics.ntua.gr/~micronano/ERG%20TEXNIKES/Simeioseis\\_TEM.pdf](http://www.physics.ntua.gr/~micronano/ERG%20TEXNIKES/Simeioseis_TEM.pdf)

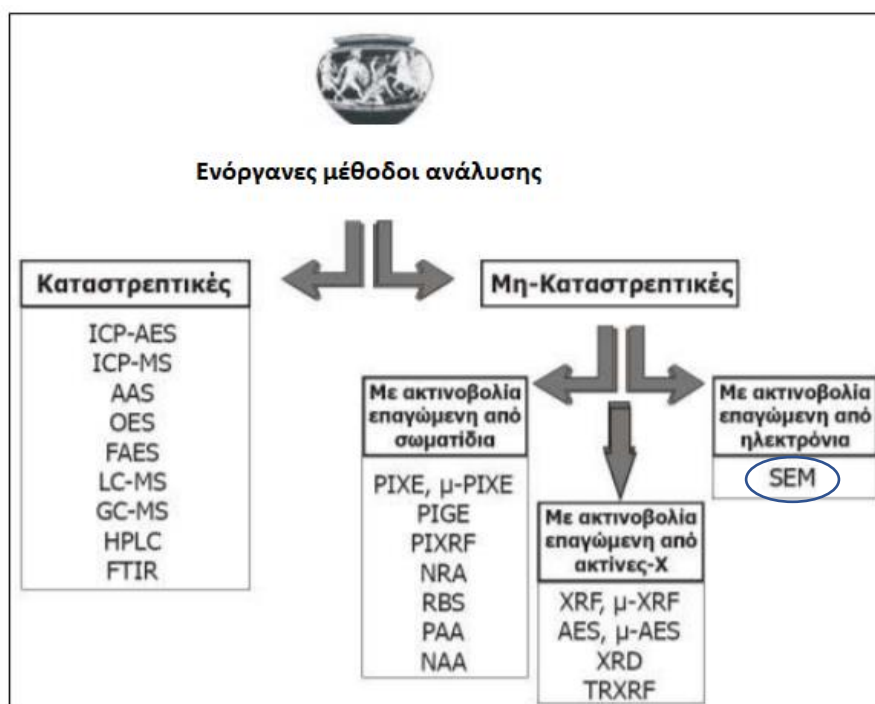
[46] [http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/.PDF](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/.PDF)

[47] <http://ikee.lib.auth.gr/record/126494/files/GRI-2011-6655.pdf>

Μέθοδοι πετρογραφικών αναλύσεων είναι:

- περίθλαση ακτίνων – X (XRD)
- πετρογραφική ανάλυση με πολωτικό μικροσκόπιο (λεπτές τομές)
- ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM, EBSD)

Στην παρακάτω εικόνα επιχειρείται μια σχηματική κατηγοριοποίηση των διάφορων ενόργανων μεθόδων ανάλυσης που χρησιμοποιούνται:



Εικόνα 6.3: Ενόργανες μέθοδοι ανάλυσης που χρησιμοποιούνται ευρέως για τη μελέτη επιφανειακών ρωγματώσεων και ανάλυσης χημικής σύστασης υλικών. [47]

Στη συνέχεια κρίνεται σκόπιμη η αναφορά στη μέθοδο S.E.M ( Scanning Electron Microscopic / Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης, η οποία και χρησιμοποιήθηκε με σκοπό τη μελέτη των επιφανειακών ρωγματώσεων των δοκιμών χάλυβα AH36 που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία.

### 6.3 Ηλεκτρονική Μικροσκοπία Σάρωσης S.E.M – Δομή του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου<sup>25</sup>

Ο άνθρωπος πάντα έδειχνε ενδιαφέρον για τους φακούς και την δυνατότητά τους να μεταβάλλουν τη διεύθυνση μίας φωτεινής δέσμης (να την διαθλούν, να την εστιάζουν κλπ) και να επηρεάζουν οπτικά - φαινομενικά το μέγεθος των αντικειμένων. Σήμερα, με τη γνώση της δυικής φύσης (κυματική και σωματιδιακή) των ηλεκτρομαγνητικών ακτινοβολιών η μικροσκοπία έχει εξελιχθεί σε πολύτιμο εργαλείο έρευνας της ύλης. Η λειτουργία του Ηλεκτρονικού Μικροσκοπίου Σάρωσης (SEM) βασίζεται στην παραγωγή δέσμης ηλεκτρονίων και την ανίχνευση των σημάτων που προκύπτουν από την αλληλεπίδραση της δέσμης με το

<sup>25</sup> [47]<http://ikee.lib.auth.gr/record/126494/files/GRI-2011-6655.pdf>



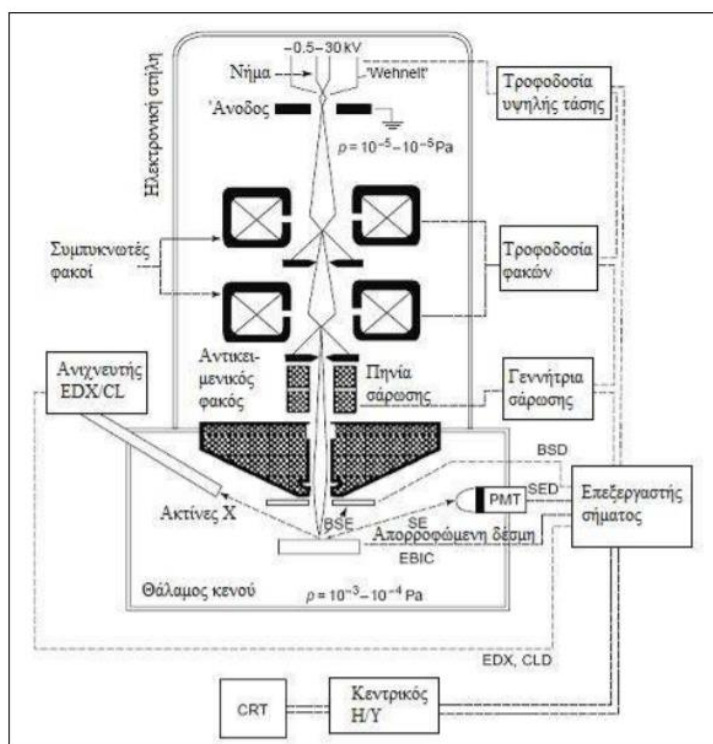
προς εξέταση δείγμα. Η χρήση των ηλεκτρονίων επέτρεψε στους ερευνητές την παρατήρηση σε ατομικό επίπεδο (Λιούτας, 2009, σελ. 7).

Η δομή του οργάνου του SEM απεικονίζεται στο σχήμα 6.4 παρακάτω. Αποτελείται κατ' αρχήν από το ηλεκτρονικό τηλεβόλο (electron gun), την κυλινδρική δηλαδή διάταξη που έχει ως σκοπό την παραγωγή της ηλεκτρονικής δέσμης. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο είναι κατασκευασμένο ανάλογα με το οπτικό μικροσκόπιο διαθέτοντας τέσσερις φακούς:

- Το συμπυκνωτή
- Τον αντικειμενικό
- Τον ενδιάμεσο και
- Το φακό προβολής, ή προβολέα

Όλα τα ανωτέρω είναι συγκεντρωμένα στο εσωτερικό μίας κοίλης μεταλλικής στήλης σε συνθήκες κενού. Η δέσμη παράγεται από ένα νήμα βολφραμίου (tungsten, W) σε σχήμα V, το οποίο θερμαίνεται μέσω ενός κυκλώματος υψηλής τάσεως (1000 - 40000V), απελευθερώνει ηλεκτρόνια. Το φαινόμενο αυτό, κατά το οποίο η θέρμανση ενός υλικού οδηγεί στην εκπομπή ηλεκτρονίων, καθώς αυτά διαφεύγουν από το δυναμικό φράγμα του, ονομάζεται θερμιονική εκπομπή.

Επειδή τα εκπεμπόμενα ηλεκτρόνια δεν έχουν συγκεκριμένο προσανατολισμό, κάτω από το νήμα βολφραμίου υπάρχει ένα πλέγμα με θετικό δυναμικό, το οποίο τα έλκει και τα κατευθύνει προς τα κάτω (προς το δείγμα). Όταν όμως τα ηλεκτρόνια περάσουν το πλέγμα, διασκορπίζονται εκ νέου, γεγονός που κάνει απαραίτητη την παρουσία ενός ηλεκτρομαγνητικού πεδίου με αρνητικό δυναμικό που θα τα απομακρύνει από τα τοιχώματα του κυλίνδρου. Αυτόν τον ρόλο έχει μια σειρά πηνίων (απόκλισης) στα τοιχώματα, η οποία κατευθύνει τα ηλεκτρόνια προς το κέντρο και τα εστιάζει κατά το δυνατόν στο δείγμα. Ένας άλλος τρόπος εστίασης των ηλεκτρονίων στο δείγμα είναι με ηλεκτρονικούς φακούς.



Εικόνα 6.4: Η δομή του S.E.M. [47]

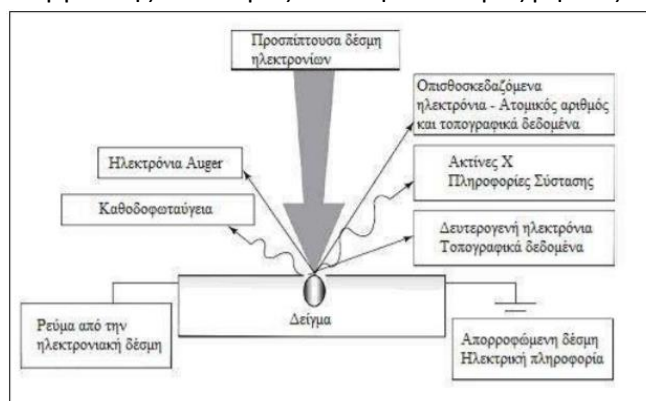
Όταν η δέσμη των ηλεκτρονίων που ονομάζεται πρωτογενής (primary electrons, PE) προσπέσει στο δείγμα, παρατηρούνται διάφοροι τύποι αλληλεπιδράσεων, καθεμία από τις οποίες μπορεί με την κατάλληλη ανιχνευτική διάταξη να παρέχει πληροφορίες που μαρτυρούν τα χαρακτηριστικά του προς ανάλυση υλικού. (βλ. και Σχ. 6.4).

- Υπάρχει η περίπτωση κατά την οποία το δείγμα είναι αρκετά λεπτό ώστε ένα μέρος της δέσμης να το διαπεράσει. Τότε, τα εξερχόμενα κάτωθεν του δείγματος ηλεκτρόνια διακρίνονται: στα διερχόμενα χωρίς να έχουν υποστεί καμιά αλληλεπίδραση (διερχόμενη δέσμη, trespassing electrons - TE), στα ελαστικώς σκεδαζόμενα (περιθλώμενες δέσμες, dispersive electrons - DE) και στα ανελαστικώς σκεδαζόμενα με απώλειες ενέργειας (energy loss electrons - ELE).

- Εκτός από τα διερχόμενα ηλεκτρόνια, υπάρχουν ομάδες που αλληλεπιδρούν με τα άτομα και εξέρχονται άνωθεν του δείγματος.

- Όταν τα ηλεκτρόνια σκεδαζονται ελαστικά από τα άτομα, τα δεύτερα απελευθερώνουν ηλεκτρόνια από τη στιβάδα σθένους τους που ονομάζονται δευτερογενή (secondary electrons - SE). Έχουν συνήθως μικρές ενέργειες (0 – 50 eV) και γι' αυτό, μόνο εάν προέρχονται από μια ζώνη βάθους 10 nm από την επιφάνεια του δείγματος, κατορθώνουν να εξέλθουν απ' αυτό και να ανιχνευτούν από το SEM.
- Καθώς τα πρωτογενή ηλεκτρόνια έχουν μεγάλη κινητική ενέργεια, με συνεχή σκέδαση (με μικρή ή μεγαλύτερη απώλεια ενέργειας) εξέρχονται τελικά από το δείγμα με μεγάλη γωνία και τότε ονομάζονται οπισθοσκεδαζόμενα (backscattered electrons - BSE).
- Η άμεση αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας με τα άτομα του υλικού συνοδεύεται από εκπομπή μαλακών και σκληρών ακτίνων-X (μεγάλου και μικρού μήκους κύματος) με συνεχές φάσμα (CX-rays). Η ταυτότητα του υλικού μπορεί να αποκαλυφθεί όταν κατά τη διέγερση των ατόμων αποβάλλεται ηλεκτρόνιο εσωτερικής στιβάδας με ταυτόχρονη εκπομπή ακτίνων-X με γραμμικό φάσμα (ChX-rays).
- Οι ακτίνες X διεγείρουν με της σειρά τους τα άτομα απελευθερώνοντας ηλεκτρόνια από την εξωτερική τους στιβάδα, τα ηλεκτρόνια Auger 56 (AE). Τέλος, η αποδιέγερση ενός ατόμου γίνεται με εκπομπή φωτονίου και το φαινόμενο ονομάζεται καθοδοφωταύγεια (cathodoluminescence - CL).

Ανάλογα με το προς εξέταση υλικό και με το είδος της πληροφορίας που αναζητά ο ερευνητής, επιλέγεται η κλασική σαρωτική ηλεκτρονική μικροσκοπία (SEM), η συμβατική διερχόμενης δέσμης (TEM), ο συνδυασμός των δύο (STEM), η σαρωτική μικροσκοπία Auger (SAE) ή ο συνδυασμός SEM και φασματοσκοπικής ανάλυσης των ακτίνων- (φασματοσκοπία ενεργειακής διασποράς – EDS ή διασποράς μήκους κύματος - WDS) και άλλες μέθοδοι.



Εικόνα 6.5: Οι αλληλεπιδράσεις της ηλεκτρονικής δέσμης με τα άτομα του δείγματος, καθώς και τα οι πληροφορίες που παρέχουν. [47]

## 6.4 Επιλογή και προετοιμασία δείγματος<sup>26</sup>

Τα αγωγίμα υλικά επιτρέπουν τη διέλευση των ηλεκτρονίων στο εσωτερικό τους σε αντίθεση με τα μη αγωγίμα, τα οποία κατά συνέπεια δεν μπορούν να παρατηρηθούν με ηλεκτρονική μικροσκοπία ως έχουν. Είναι λοιπόν αναγκαία η προσθήκη λεπτής στρώσης αγωγίμου υλικού, όπως ο χρυσός (Au) ή ο άνθρακας (C) σε ατμόσφαιρα αργού, κυρίως δε ο τελευταίος, λόγω μικρότερου κόστους. Χρησιμοποιούνται επίσης άλλα μέταλλα, όπως ο λευκόχρυσος (Pt) ή κράματα χρυσού – παλλαδίου (Au - Pd). Έτσι σχηματίζεται μία αγωγίμη επικάλυψη που προστατεύει επίσης το δείγμα από την υπερθέρμανση λόγω της ηλεκτρονικής δέσμης. Στην παρούσα διπλωματική εργασία δεν απαιτήθηκε η προσθήκη επιπλέον αγωγίμου υλικού για την ηλεκτρονική μικροσκοπία των δοκιμών χάλυβα AH36 καθώς, όπως είδαμε, η παρουσία και μόνο του C είναι αρκετή ώστε να μην έχουμε προβλήματα παρατήρησης της μικροδομής του χάλυβα. Το δείγμα, στην περίπτωση που είναι μικρό, μπορεί να απαιτεί εγκιβωτισμό σε ρητίνη για να διευκολυνθεί η παρατήρησή του αλλά και για να μην επιμολυνθεί. Καθώς για την παρατήρηση είναι απαραίτητο το υψηλό κενό, τα δείγματα πρέπει να είναι απολύτως στεγνά, ώστε να αποφευχθεί η αποβολή αερίων μέσα στο όργανο. Θεωρητικά, μπορεί η μέθοδος να είναι μη καταστρεπτική, αν το μέγεθος του θαλάμου κενού επιτρέπει την εισαγωγή ολόκληρου του αντικειμένου. Τα δευτερογενή ηλεκτρόνια παρέχουν εικόνες υψηλής ανάλυσης από την τοπογραφία της επιφάνειας, των προσμίξεων και των αδρανών μέσα στο σώμα του δείγματος, είτε πρόκειται για την αυθεντική επιφάνεια κεραμικού (untreated surface) είτε για σημεία πρόσφατης θραύσης (fresh fracture zones).

## 6.5 Παρατήρηση και αποτελέσματα<sup>27</sup>

Μετά την τοποθέτηση του δείγματος στο εσωτερικό του SEM, ο κύλινδρος κλείνεται ερμητικά και τίθεται σε λειτουργία ένας απορροφητήρας (αντλία κενού), ούτως ώστε να δημιουργηθεί κενό αέρος στο εσωτερικό του. Όταν το δείγμα βρίσκεται σε συνθήκες κενού, ξεκινά η θέρμανση του νήματος βολφραμίου για την παραγωγή της ηλεκτρονικής δέσμης. Για τη σωστή λειτουργία του μικροσκοπίου, η τάση του νήματος πρέπει να έχει την τιμή στην οποία αντιστοιχεί η μέγιστη - και άρα σταθερή - ροή ηλεκτρονίων. Αυτό είναι αναγκαίο, αφού τυχόν αυξομειώσεις στην τάση του ρεύματος επηρεάζουν αρνητικά το χρόνο ζωής του νήματος. Στη συνέχεια τίθεται σε λειτουργία η οθόνη του SEM και κατ' επέκταση οι ανιχνευτικές διατάξεις και το σύστημα σάρωσης. Σε μικρό χρονικό διάστημα το είδωλο του δείγματος προβάλλεται στην οθόνη. Το SEM, συνδεδεμένο με ηλεκτρονικό υπολογιστή, παρέχει τη δυνατότητα επεξεργασίας της εικόνας που λαμβάνεται από την εξέταση του δείγματος. Η σημαντικότερη όμως ικανότητα αυτού του μικροσκοπίου είναι η αναγνώριση των χημικών στοιχείων που αποτελούν το δείγμα, η εύρεση της αναλογίας τους σε κάθε περιοχή αυτού, καθώς και η απεικόνισή τους σε μορφή ιστογράμματος. Ο μελετητής έχει τη δυνατότητα να προσδιορίσει εκτός από τη σύσταση του υλικού, την ύπαρξη αλλά και το είδος της διάβρωσης που τυχόν υπέστη.

<sup>26</sup> - <sup>27</sup> [47]<http://ikee.lib.auth.gr/record/126494/files/GRI-2011-6655.pdf>



## A. Πειραματικό μέρος

### 7. Μεταλλογραφική ανάλυση μικροδομής χάλυβα

#### Γενική περιγραφή Μεταλλογραφίας

Μεταλλογραφία είναι ο επιστημονικός κλάδος που ασχολείται με την εξέταση και καθορισμό της σύστασης και της βαθύτερης δομής των συστατικών των μετάλλων, των κραμάτων και των άλλων διαφόρων υλικών, που πραγματοποιείται με την παρατήρηση των υλικών (στο εξής μεταλλογραφική παρατήρηση), με χρήση μικροσκοπίου είτε οπτικού είτε ηλεκτρονικού αλλά και με άλλες τεχνικές όπως η χρήση ακτινών Χ. Ωστόσο, η πιο διαδεδομένη και η πιο οικεία μέθοδος παρατήρησης είναι με χρήση οπτικού μικροσκοπίου και αυτή χρησιμοποιήθηκε για την παρατήρηση των μεταλλικών υλικών στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Η παρατήρηση μεταλλικών υλικών με οπτικό μικροσκόπιο είναι μια από τις σημαντικές μεθόδους μελέτης αυτών των υλικών, εφόσον η χημική τους σύσταση είναι γνωστή. Αποκαλύπτει τις φάσεις που υπάρχουν στο υλικό, το σχήμα και το μέγεθος των κρυστάλλων που τις αποτελούν, και την τυχόν ύπαρξη ξένων σωμάτων (πόρων, εγκλεισμάτων). Από τα στοιχεία αυτά μπορούν να βγουν συμπεράσματα για τις θερμικές κατεργασίες και την πλαστική παραμόρφωση που έχει υποστεί το υλικό, και να προβλεφθεί η μηχανική συμπεριφορά.

Η μεταλλογραφική παρατήρηση πραγματοποιείται ως εξής:

Κατασκευάζεται μια επίπεδη τομή στο δείγμα του υλικού, η οποία κατόπιν στυλβώνεται και υποβάλλεται σε χημική προσβολή. Επειδή τα διαφορά στοιχεία της δομής του υλικού (κρύσταλλοι της κάθε φάσης, σύνορα κόκκων και άλλα τυχόν στοιχεία) προσβάλλονται κατά διαφορετικό τρόπο και σε διαφορετικό βαθμό το καθένα, γίνονται παρατηρήσιμα σε οπτικό μικροσκόπιο ανάκλασης. Πιο συγκεκριμένα:

- Η χημική προσβολή δημιουργεί αυλάκια κατά μήκος των συνόρων των κόκκων, επειδή τα σύνορα παθαίνουν εντονότερη χημική διάβρωση.
- Στους ευτηκτικούς και ευτηκτοειδείς σχηματισμούς, στους οποίους τα σύνορα των κόκκων είναι πολύ πυκνά, παράγονται αντίστοιχα πολύ πυκνά αυλάκια.
- Σε ειδικές περιπτώσεις, κάποιες φάσεις ξεχωρίζουν από το διαφορετικό τους χρώμα και την διαφορετική τους φωτεινότητα. Το χρώμα και η φωτεινότητα μπορούν να οφειλονται είτε στην ίδια φάση είτε στην επίδραση του αντιδραστηρίου της χημικής προσβολής.
- Αν το υλικό αποτελείται από μια σκληρή και μια μαλακή φάση τότε αφαιρείται λιγότερο υλικό από την σκληρή φάση κατά την διάρκεια της στίλβωσης και οι κόκκοι της σχηματίζουν μικροσκοπικά «οροπέδια» πάνω στην στυλβωμένη επιφάνεια.
- Άλλοι λιγότερο συχνοί μηχανισμοί μπορεί να δημιουργούν άλλα είδη ανάγλυφου.

Σε αυτή την εργασία ζητείται να εξετασθούν μεταλλογραφικά δοκίμια ναυπηγικού χάλυβα ΑΝ36 που χρησιμοποιείται ευρύτατα στις κατασκευές πλοίων, όπως έχει αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

## 7.1 Πειραματική διαδικασία

Για να γίνει η μεταλλογραφική παρατήρηση των ανωτέρω δοκιμίων, αυτά υποβλήθηκαν σε διαδικασία προετοιμασίας, τα στάδια της οποίας συνοπτικά είναι τα εξής:

- i. Κοπή του αρχικού τεμαχίου
- ii. Εγκιβωτισμός
- iii. Λείανση
- iv. Καθαρισμός επιφανειών με χρήση υπερήχων
- v. Χημική προσβολή με Nital
- vi. Παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο.

Για κάθε ένα από τα τεμάχια μας ακολουθήθηκε η ίδια διαδικασία αλλά με κάποιες διαφοροποιήσεις ανάλογα με το υλικό που έχουμε να διαχειριστούμε. Τα δοκίμια μας έπρεπε να κοπούν σε σχετικά μικρό μέγεθος ώστε να μπορούν να χωρέσουν στο μικροσκόπιο και να γίνει η παρατήρηση τους. Στη συνέχεια γίνεται ο εγκιβωτισμός του τεμαχίου, για να έχουμε την δυνατότητα συγκράτησής του, σε περίπτωση που είναι πολύ μικρό. Έπειτα, γίνεται η λείανση του υλικού στο μηχάνημα λείανσης του εργαστηρίου, μέχρι να πετύχουμε την μέγιστη δυνατή λεία επιφάνεια (καθρέφτης) . Ακολουθεί η χημική προσβολή και η διαδικασία τελειώνει με την παρατήρηση του τεμαχίου στο μικροσκόπιο.

## 7.2 Κοπή του αρχικού τεμαχίου

Για την κοπή των αρχικών τεμαχίων από ναυπηγικό χάλυβα ΑΗ36 χρησιμοποιήθηκε πριόνι/σέγα. Αξίζει να σημειωθεί πως τα δοκίμια αυτά που προέκυψαν από τον τεμαχισμό των αρχικών δοκιμίων χάλυβα ΑΗ36 έπρεπε κατά προσέγγιση να έχουν τέτοιες διαστάσεις ώστε να μην είναι ούτε πολύ μικρά ώστε να απαιτείται πολύ μεγάλη μεγέθυνση από το οπτικό μικροσκόπιο αλλά και ούτε μεγαλύτερα από ένα συγκεκριμένο όριο ώστε να είναι δυνατή η τοποθέτησή τους στο οπτικό μικροσκόπιο για την παρατήρησή τους. Αφού λοιπόν ετοιμάστηκαν τα δοκίμια ναυπηγικού χάλυβα επιθυμητών διαστάσεων, στη συνέχεια λειάνθηκαν με λειαντικό τροχό από κορούνδιο ( $Al_2O_3$ ) ώστε να μην υπάρχουν ανεπιθύμητες ακμές στα άκρα και να είναι ευκολότερος στη συνέχεια ο εγκιβωτισμός των δοκιμίων (θα αναφερθεί πιο αναλυτικά στη συνέχεια). Αυτή η μορφή λείανσης δεν έχει να κάνει με την ενότητα λείανσης/στίλβωσης που είχε αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας και θα αναφερθεί επιγραμματικά και στη συνέχεια. Στη συνέχεια παρατίθενται δύο φωτογραφίες που παρουσιάζουν τόσο το σημείο πρόσδεσης των αρχικών δοκιμίων με σκοπό την κοπή με χρήση σέγας καθώς και το λειαντικό τροχό από κορούνδιο που αναφέρθηκε.



Εικόνα 7.1: Πρόσδεση δοκιμίων στη διάταξη σύσφιξης πριν την κοπή με τη σέγα.

Εικόνα 7.2: Λείανση δοκιμίων με τροχό από κορούνδιο για αποφυγή ανεπιθύμητων ακμών.



### 7.3 Εγκιβωτισμός

Στην περίπτωση που τα προς εξέταση τεμάχια έχουν τόσο μικρό μέγεθος ώστε να είναι αδύνατη η συγκράτησή τους με το χέρι για να λειανθούν ακολουθείται μια τεχνική γνωστή ως εγκιβωτισμός κατά την οποία το προς εξέταση τεμάχιο τοποθετείται σε θερμαντική μηχανή μαζί με κόκκους πλαστικού. Η θερμαντική μηχανή είναι ένας θερμαινόμενος κύλινδρος του οποίου η ανοιχτή άκρη κλείνει με έμβολο. Με την θέρμανση οι κόκκοι του πλαστικού που έχουν σκεπάσει το προς εξέταση τεμάχιο, λιώνουν και το λιωμένο πλαστικό διαχέεται περιμετρικά του τεμαχίου. Έτσι, δημιουργείται ένα πλαστικό αντικείμενο στη μια άκρη του οποίου βρίσκεται η προς εξέταση επιφάνεια του υλικού, το οποίο έχει τέτοιο μέγεθος ώστε να είναι δυνατή η συγκράτησή του με το χέρι και η λείανση του στη λειαντική μηχανή. Εδώ θα πρέπει να σημειωθεί ότι ο εγκιβωτισμός προηγείται της λείανσης. Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικές φωτογραφίες που παρουσιάζουν τη μήτρα μέσα στην οποία τοποθετήθηκαν οι κόκκοι πλαστικού, οι οποίοι όταν θερμάνθηκαν «αγκάλιασαν» περιμετρικά τα δοκίμια ναυπηγικού χάλυβα που είχαν αρχικά κοπεί (όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα) και τοποθετηθεί εντός της μήτρας. Τέλος, παρουσιάζεται το τελικό αποτέλεσμα από τον εγκιβωτισμό των χαλύβδινων δοκιμίων πριν ακολουθήσει η διαδικασία της λείανσης/στίλβωσης.



Εικόνα 7.3: Μήτρα εγκιβωτισμού.

Εικόνα 7.4: Τελική μορφή σετ δοκιμίων μετά τον εγκιβωτισμό και πριν τη λείανση.



### 7.4 Λείανση

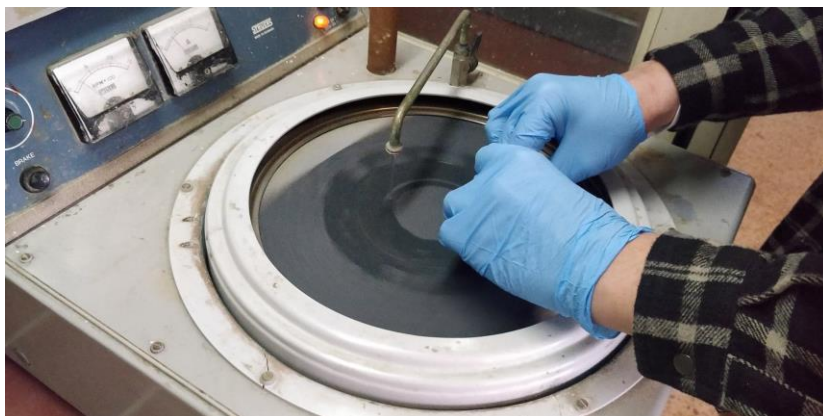
Μετά την κοπή του προς εξέταση τεμαχίου λαμβάνει χώρα η διαδικασία της λείανσης, η οποία αποσκοπεί στην ελαχιστοποίηση της τραχύτητας της επιφάνειας που θα εξετασθεί στο μικροσκόπιο και στην ανάδειξη της μικροδομής η οποία γίνεται περισσότερο αντιληπτή με την χημική προσβολή. Η διαδικασία της λείανσης που ακολουθήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία έχει ως εξής:

Η λείανση των τεμαχίων έγινε σε λειαντική μηχανή του εργαστηρίου και υλοποιήθηκε σε συνολικά 7 φάσεις. Ο αριθμός των φάσεων που ακολουθούνται εξαρτάται σε σημαντικό βαθμό από τη σκληρότητα του εξεταζόμενου υλικού καθώς και την επιδιωκόμενη τελική τραχύτητα του τεμαχίου. Σκοπός της παρούσας διπλωματικής ήταν η λείανση/στίλβωση των δοκιμίων ναυπηγικού χάλυβα μέχρι το σημείο του καθρεφτίσματος των εξεταζόμενων επιφανειών, ώστε με τη χημική προσβολή στη συνέχεια να έχουμε ιδιαίτερα ευδιάκριτα αποτελέσματα όσον αφορά την εξέταση της μικροδομής του εξεταζόμενου χάλυβα. Έτσι στον εξεταζόμενο χάλυβα η λείανση έγινε σε 7 στάδια που συνοπτικά παρουσιάζονται παρακάτω:

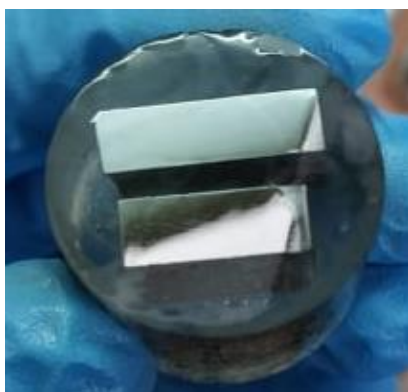
- Λειαντικά φύλλα P220
- Λειαντικά φύλλα P400
- Λειαντικά φύλλα P800

- Λειαντικά φύλλα P1000
- Λειαντικά φύλλα P2000
- Λειαντικά φύλλα από ύφασμα (clothe)
- Λειαντικά φύλλα από βελούδο

Στο στάδιο αυτό δεν κρίνεται σκόπιμη η αναλυτική αναφορά των σταδίων αυτών καθώς και η προσδοκώμενη τραχύτητα κάθε σταδίου καθώς έχει γίνει λεπτομερής αναφορά στο θεωρητικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, αξίζει να αναφερθεί πως προφανώς έχουμε ελάττωση της τραχύτητας των δοκιμίων καθώς αυξάνει ο αριθμός των κόκκων των λειαντικών φύλλων που χρησιμοποιούμε. Για λόγους συνοχής, να υπενθυμίσουμε ότι σε κάθε στάδιο λείανσης, υπάρχει συνεχής ροή νερού όσμωσης ώστε να απομακρύνονται τα απόβλητα που δημιουργούνται σε κάθε κύκλο λείανσης ενώ ταυτόχρονα επιτυγχάνεται θερμική απαγωγή λόγω τύρβης στην περιοχή λείανσης. Τέλος, στα 2 τελευταία στάδια λείανσης, στην ουσία δεν έχουμε περαιτέρω αφαίρεση υλικού, παρά μόνο μείωση της τραχύτητας των δοκιμίων ( τάξη μεγέθους [μm] )μέχρι τελικού καθρεφτίσματος των επιφανειών του εξεταζόμενου υλικού. Στα στάδια αυτά χρησιμοποιείται επιπλέον διαμαντόπαστα ενώ οι στροφές της λείανσης είναι σχετικά υψηλές ώστε να επιταχύνουμε τη διαδικασία, η οποία λόγω της χαμηλής τραχύτητας των λειαντικών φύλλων εξελίσσεται με πολύ αργό ρυθμό. Παρακάτω παρατίθενται για λόγους πληρότητας εικόνες τόσο της συνολικής διάταξης που χρησιμοποιήθηκε για τη διαδικασία της λείανσης καθώς και το τελικό επιθυμητό αποτέλεσμα όσον αφορά την επιφάνεια του εξεταζόμενου υλικού.



Εικόνα 7.5: Συνολική διάταξη λείανσης σε αρχικό στάδιο όπως φαίνεται από το χρησιμοποιούμενο λειαντικό φύλλο και τη χρήση νερού όσμωσης.



Εικόνα 7.6: Τελικό καθρέφτισμα των επιφανειών των δοκιμίων.



## 7.5 Καθαρισμός επιφανειών με χρήση υπερήχων

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως, ταυτόχρονα με την διαδικασία της λείανσης, τα χαλύβδινα δοκίμια τροφοδοτούνται με συνεχή παροχή νερού όσμωσης ώστε να απομακρύνονται τυχόν απόβλιττα που κατακάθονται στις επιφάνειές τους. Τυχόν παρουσία αποβίττων στην επιφάνεια των χαλύβδινων δοκιμών κατά τη διάρκεια της μεταλλογραφικής ανάλυσης εισάγουν σφάλματα οπτικής παρατήρησης και κατά συνέπεια μπορεί να οδηγηθούμε σε εσφαλμένες παρατηρήσεις σχετικά με τη μικροδομή που εξετάζεται. Για το λόγο αυτό, αμέσως μετά τη διαδικασία της λείανσης, ακολουθείται μια διαδικασία καθαρισμού των στυλβωμένων επιφανειών που ονομάζεται Ultrasonic ή χημικός καθαρισμός με χρήση υπερήχων. Τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται η συνολική διάταξη είναι:

- Μια λεκάνη η οποία τροφοδοτείται με νερό όσμωσης κατά το 1/3 περίπου της συνολικής της χωρητικότητας
- Ένα δοχείο το οποίο γεμίζουμε κατα το 1/3 με αιθυλική αλκοόλη
- Ένα συγκρατητή του δοχείου που αναφέρθηκε ώστε η στάθμη του νερού της λεκάνης να υπερκαλύπτει τη στάθμη του διαλύματος της αλκοόλης στο δοχείο
- Και φυσικά κατάλληλες ρυθμιστικές διατάξεις ώστε να γίνεται η επιλογή των συχνοτήτων υπερηχητικών ταλαντώσεων, οι οποίες «ταξιδεύουν» στο νερό όσμωσης της λεκάνης και απο κει στο διάλυμα αιθυλικής αλκοόλης μέσα στο οποίο βρίσκονται οι προς καθαρισμό χαλύβδινες επιφάνειες.

Αξίζει να σημειωθεί ότι καθ'όλη τη διαδικασία καθαρισμού οι μεταλλικές επιφάνειες που θέλουμε να απομακρύνουμε τυχόν απόβλιττα πρέπει να είναι συνεχώς εμβυπτισμένες στο διάλυμα αιθανόλης, ενώ ορισμένες φορές ενδείκνυται η συνεχής ανάδευση των χαλύβδινων δοκιμών ώστε να μην έχουμε κατακάθιση των αποβλίττων ξανά πάνω στις επιφάνειες που θέλουμε να παρατηρήσουμε. Στη συνέχεια παρουσιάζονται ενδεικτικά μερικές εικόνες που τραβήχτηκαν στο εργαστήριο Φυσικοχημείας και εφαρμοσμένης Ηλεκτροχημείας κατά τη διάρκεια εκτέλεσης των πειραμάτων ώστε να γίνει πιο κατανοητή η διαδικασία που ακολουθήθηκε:



Εικόνα 7.7: Γενική διάταξη μηχανήματος ultrasonic



Εικόνα 7.8: Σύστημα τροφοδοσίας νερού όσμωσης στη λεκάνη



Εικόνα 7.9: Ρυθμιστής συχνότητας



Εικόνα 7.10: Συγκρατητής δοχείου

## 7.6 Χημική προσβολή

Η χημική προσβολή ακολουθεί τη λείανση. Αφού τα τεμάχια λειανθούν προσβάλλονται χημικά με κατάλληλα διαλύματα έτσι ώστε τα διάφορα στοιχεία της δομής του υλικού να γίνονται παρατηρήσιμα σε οπτικό μικροσκόπιο ανάκλασης. Αυτό συμβαίνει διότι τα διάφορα στοιχεία της δομής του υλικού (κρύσταλλοι της κάθε φάσης, σύνορα των κόκκων, και άλλα τυχόν στοιχεία) προσβάλλονται κατά διαφορετικό τρόπο και σε διαφορετικό βαθμό το καθένα. Επίσης η χημική αυτή προσβολή δημιουργεί αυλάκια κατά μήκος των συνόρων των κόκκων, επειδή τα σύνορα παθαίνουν εντονότερη χημική διάβρωση. Σε ειδικές περιπτώσεις, κάποιες φάσεις ξεχωρίζουν από το διαφορετικό τους χρώμα και τη διαφορετική τους φωτεινότητα. Το χρώμα και η φωτεινότητα μπορούν να οφείλονται είτε στις φάσεις άνθρακα είτε στην επίδραση του αντιδραστηρίου της χημικής προσβολής.

Αυτή η τεχνική χρησιμοποιεί μια ελεγχόμενη διάβρωση που πηγάζει από τις διαφορές των ηλεκτροχημικών δυναμικών των διαφόρων περιοχών της επιφάνειας με φυσικές ή χημικές ετερογένειες. Η χημική προσβολή επιλεκτικά χρωματίζει ή αποχρωματίζει τις διάφορες φάσεις που αποτελούν το υλικό. Εκτός από τα γενικής χρήσης για χάλυβες αντιδραστήρια χημικής προσβολής, όπως είναι το Nital (διάλυμα νιτρικού οξέος σε αλκοόλη, το οποίο χρησιμοποιείται πολύ σε φεριττο-περλιτικούς χάλυβες), ένας μεγάλος αριθμός αντιδραστηρίων έχει αναπτυχθεί για την αποκάλυψη συγκεκριμένων χαρακτηριστικών της μικροδομής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία χρησιμοποιείται διάλυμα νιτρικού οξέος σε αλκοόλη, ή αλλιώς Nital.

## 7.7 Χημική προσβολή με Nital

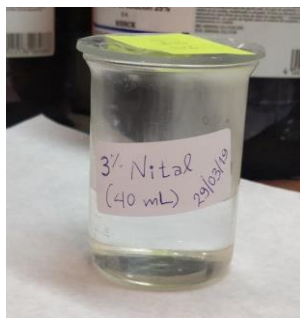
Το Nital, όπως έχει ήδη αναφερθεί και σε προηγούμενο κεφάλαιο είναι το πιο κοινό αντιδραστήριο χημικής προσβολής που απαντάται σε ένα εργαστήριο που ασχολείται με την μεταλλογραφία των χαλύβων. Αυτό οφείλεται κυρίως στην ικανότητά του να αποκαλύπτει τα όρια μεταξύ των κόκκων του φερρίτη και του περλίτη, και να χρωματίζει το πρώτο λευκό ή ανοιχτόχρωμο και το δεύτερο γκρι σκούρο ή μαύρο. Έτσι, καθώς οι φερριτο - περλιτικοί χάλυβες καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό των χρησιμοποιούμενων χαλύβων στη

βιομηχανία, το Nital απολαμβάνει ευρείας χρήσης και αποδοχής. Η χημική του σύσταση ποικίλει κατά μικρά ποσοστά, αλλά κυρίως χρησιμοποιείται ένα διάλυμα 2% νιτρικού οξέος ( $\text{HNO}_3$ ) σε αιθυλική αλκοόλη ( $\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ ), αλλά το ποσοστό αυτό μπορεί να αυξηθεί σε 5% ή και σε εξαιρετικές περιπτώσεις να φτάσει τα επίπεδα του 10 - 15%. Στην παρούσα διπλωματική, το Nital που χρησιμοποιούμε για το χρωματισμό των ορίων των κόκκων είναι περιεκτικότητας 3% σε νιτρικό οξύ.

Οι χρόνοι προσβολής είναι ισχυρή συνάρτηση της χημικής του σύστασης και τις περισσότερες φορές εξαρτώνται και από τη μικροδομή του υλικού, από τις φάσεις δηλαδή που εμπεριέχονται στο εσωτερικό του, καθώς και από τις θερμικές κατεργασίες τις οποίες έχει υποστεί. Όταν πρόκειται για έναν φερριτο - περλιτικό χάλυβα για παράδειγμα, το δοκίμιο εμβαπτίζεται σε ένα αντιδραστήριο Nital 3% για 20-30 sec ως αρχική δοκιμή. Το αντιδραστήριο έπειτα αφαιρείται από την επιφάνεια του δοκιμίου, αρχικά με αρκετό αποιονισμένο νερό και έπειτα με καθαρή αλκοόλη για την αποφυγή δημιουργίας λεκκέδων στην επιφάνεια. Το δοκίμιο, τέλος, στεγνώνεται σε θερμό αέρα. Μετά από την πρώτη δοκιμή, το δοκίμιο ελέγχεται πρώτα με γυμνό μάτι και έπειτα με την χρήση του οπτικού μικροσκοπίου. Σε αυτό το στάδιο υπεισέρχεται ισχυρά ο παράγοντας της εμπειρίας.

Μετά το τέλος της χημικής προσβολής, ακόμα και με γυμνό μάτι, ο έμπειρος μελετητής μπορεί να αντιληφθεί εάν το δοκίμιο είναι έτοιμο για οπτική μικροσκοπία, εάν το αντιδραστήριο δεν έχει προσβάλλει το δοκίμιο σε βαθμό που να αναγνωρίζεται η μικροδομή του (under-etched), τουλάχιστον αυτή που προδιαγράφεται να αποκαλυφθεί, είτε εάν πρόκειται για την περίπτωση όπου το αντιδραστήριο έχει προσβάλλει το δοκίμιο σε μεγάλο βαθμό, δηλαδή το έχει «κάψει», και δεν διακρίνονται πλέον φάσεις ή δεν μπορεί να γίνει καλή εστίαση λόγω διαφορετικών επιπέδων που έχουν δημιουργηθεί από μεγάλες διαφορές μεταξύ της σκληρότητας των φάσεων (over-etched). Βέβαια, στην περίπτωση όπου δεν είναι δυνατή η οπτική αναγνώριση, ο έλεγχος με το οπτικό μικροσκόπιο μπορεί να οδηγήσει στο ίδιο αποτέλεσμα, ή απλά να επιβεβαιώσει τα αποτελέσματα που δίνει η οπτική αναγνώριση. Ανάλογα με τα αποτελέσματα που δίνει η πρώτη δοκιμή, επιλέγεται και η συνέχεια στη ροή της διαδικασίας. Αν το δοκίμιο δεν είναι στην επιθυμητή κατάσταση, επιλέγεται να διαφοροποιηθούν κάποιες από τις παραμέτρους που εισήχθησαν στην διαδικασία, με πρώτη επιλογή το χρόνο. Αν έχει «καεί» το δοκίμιο, εφ' όσον στιλβωθεί από την αρχή, εμβαπτίζεται στο αντιδραστήριο για μικρότερο χρονικό διάστημα από πριν και επαναλαμβάνεται ο έλεγχος. Αν όμως το δοκίμιο δεν έχει προσβληθεί αρκετά για να δημιουργηθεί η απαιτούμενη αντίθεση (contrast), υπάρχουν δύο επιλογές. Η πρώτη από αυτές είναι να συνεχιστεί η διαδικασία από εκεί που είχε μείνει, δηλαδή να επανεμβαπτιστεί το δοκίμιο στο αντιδραστήριο για ένα επιπλέον χρονικό διάστημα. Η άλλη επιλογή είναι να στιλβωθεί το δοκίμιο εκ νέου και να επαναληφθεί η χημική προσβολή από την αρχή.

Το διάλυμα που χρησιμοποιήθηκε για το etching φαίνεται στην παρακάτω εικόνα:



Εικόνα 7.11: Διάλυμα νιτρικού οξέος 3%



## 7.8 Παρατήρηση στο μικροσκόπιο<sup>28</sup>

Η διαδικασία αυτή έγινε για να παρατηρηθούν οι επιφάνειες των τεμαχίων που έχουν κοπεί σε διαφορετικές θέσεις, ώστε να φωτογραφηθούν και να συγκριθούν με κάποια πρότυπα φωτογραφιών και να φτάσουμε σε χρήσιμα συμπεράσματα μικροδομής των χαλύβων, τα οποία θα αναφερθούν στη συνέχεια.

Εξοπλισμός:

- Μικροσκόπιο SONY
- Έξοδος της εικόνας μέσω φακού σε «ψηφιακή κάμερα», η οποία δίνει την εικόνα Η/Υ
- Ανάλυση της εικόνας στον Η/Υ με κατάλληλο πρόγραμμα.

Οι φωτογραφίες που ακολουθούν αφορούν την επιφάνεια των δοκιμών ναυπηγικού χάλυβα υψηλής αντοχής ΑΗ36. Έχουν τραβηχτεί από οπτικό μικροσκόπιο με μεγέθυνση από 100 μέχρι 500 φορές. Όλες οι φωτογραφίες τραβήχτηκαν με χρήση πολωμένου φακού για πιο ευκρινή συμπεράσματα. Επίσης όλες αφορούν την επιφάνεια όπως προέκυψε από την έκθεση στα διάφορα πειράματα αλλά και την αρχική έναρξη της ατμοσφαιρικής διάβρωσης πάνω στον απροστάτευτο χάλυβα. Να διευκρινιστεί πως το τελικό οπτικό αποτέλεσμα των φωτογραφιών εξαρτάται άμεσα από το χρόνο έκθεσης στο διάλυμα νιτρικού οξέος. Όσο μεγαλύτερη είναι η έκθεση των επιφανειών σε Nital, εντός πάντα των επιτρεπτών ορίων έκθεσης δοκιμών για οπτική παρατήρηση, τόσο πιο εμφανή είναι τα στοιχεία που μπορούμε να αποφανθούμε από τις φωτογραφίες καθώς και πιο διακριτά είναι τα όρια των κόκκων και οι φάσεις τους. Αν ξεπεράσουμε τα επιτρεπτά όρια έκθεσης, υπάρχει σοβαρός κίνδυνος να «κάψουμε» χρήσιμα στοιχεία που θα μπορούσαμε να αποφανθούμε από τις φωτογραφίες μικροδομής του χάλυβα που εξετάζουμε.

Σε κάθε μία φωτογραφία που παρουσιάζεται παρακάτω, θα αναφέρεται ο αριθμός του δοκιμίου που αναπαρίσταται οπτικά, η μεγέθυνση που έχει χρησιμοποιηθεί, ο χρόνος έκθεσης σε διάλυμα νιτρικού οξέος σε αλκοόλη ή αλλιώς Nital (όπως εξηγήθηκε παραπάνω), η περιοχή του δοκιμίου που έχουμε εστιάσει, η σχετική κλίμακα ώστε να γίνεται κατανοητό το μέγεθος και τα όρια των κόκκων καθώς και ορισμένα σχόλια / συμπεράσματα που προκύπτουν από τις παρακάτω εικόνες σχετικά με τις φάσεις του χάλυβα που μπορούμε να εντοπίσουμε καθώς και το μέγεθος των κόκκων.

Ο αριθμός των εικόνων που παρουσιάζονται επιλέγεται αυθαίρετα και γίνεται με κριτήριο την «καθαρότητά» τους με στόχο τον εντοπισμό της βέλτιστης σε ποιότητα και ποσότητα πληροφορίας και οπτικών συμπερασμάτων που μπορούμε να αποφανθούμε.

---

[48]<sup>28</sup> [https://www.atm-m.com/products?gclid=CjwKCAjwibzsBRAMEiWA1pHZrIQNVU7Q9iQLqLwnX-OWpgS-jAEpyirzc68jm5x-R1lfd9E6pdDifhoCfAsQAvD\\_BwE](https://www.atm-m.com/products?gclid=CjwKCAjwibzsBRAMEiWA1pHZrIQNVU7Q9iQLqLwnX-OWpgS-jAEpyirzc68jm5x-R1lfd9E6pdDifhoCfAsQAvD_BwE)

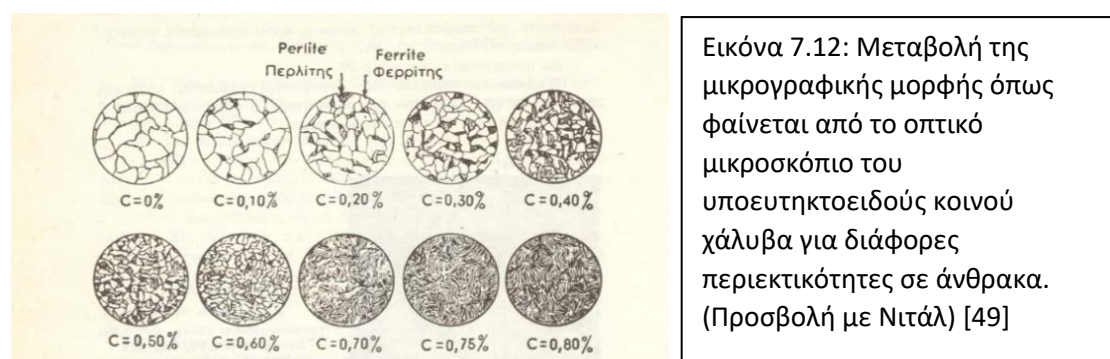
[49] [https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-3.2\\_A.Tsouknidas.pdf](https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-3.2_A.Tsouknidas.pdf)

[50] [https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-2.2\\_A.Tsouknidas.pdf](https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-2.2_A.Tsouknidas.pdf)

Πριν προχωρήσουμε στην ανάλυση των εικόνων, πρέπει να αναφερθούν τα ακόλουθα σχετικά με το υλικό που θα παρουσιαστεί:

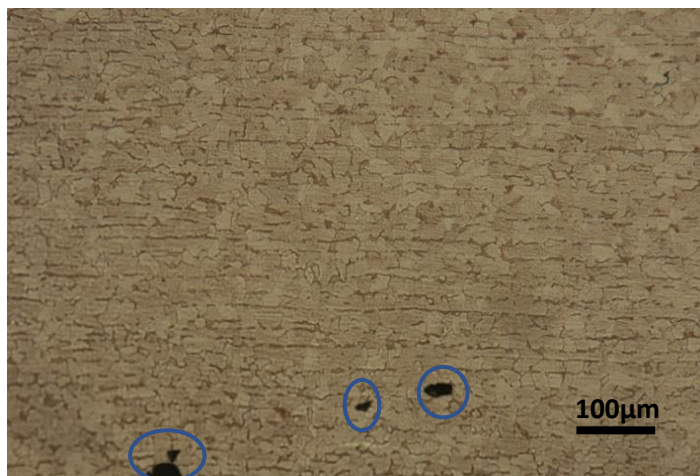
- a) Πρακτικά ο αριθμός των δοκιμών που θα αναλυθεί η μικροδομή είναι 2. Το πρώτο δοκίμιο, στο εξής Δοκ1, πρόκειται για πλευρική επιφάνεια σε σχέση με την επιφάνεια κοπής που διαμορφώθηκε με τη χρήση σέγας όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενη ενότητα. Αντίθετα, το δεύτερο δοκίμιο, στο εξής Δοκ2, πρόκειται για την επιφάνεια κοπής από το εργαλείο. Και οι 2 αυτές επιφάνειες έχουν λειανθεί, έχουν καθαριστεί με χρήση υπερήχων και έχουν υποστεί χημική προσβολή από Nital για δεδομένα χρονικά διαστήματα, τα οποία και θα αναφέρονται σε κάθε εικόνα που ακολουθεί.
- b) Έχουμε δοκιμάσει 3 διαφορετικές μεγεθύνσεις με το οπτικό μικροσκόπιο, **x100**, **x200**, **x500**, κάθε μία από τις οποίες μας δίνει διαφορετικές πληροφορίες και συμπεράσματα λόγω της διαφορετικής οπτικής και ποιότητας εικόνας που εξασφαλίζουμε.
- c) Οι φάσεις του κράματος σιδήρου-άνθρακα, στο εξής φάσεις χάλυβα, που παρουσιάζονται κατά κύριο λόγο είναι 2:
  - Περλίτης: Πρόκειται για τις μαύρες ή αρκετά σκουρόχρωμες περιοχές στις επιφάνειες των δοκιμών που θα παρουσιάσουμε.
  - Φερρίτης: Πρόκειται για τις λευκές περιοχές στις επιφάνειες των δοκιμών, οι οποίες γειτνιάζουν με τις φάσεις του περλιτικού μετασχηματισμού.

Τέλος, όσο μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε άνθρακα είναι ο χάλυβας που μελετάμε, τόσο μεγαλύτερο ποσοστό περλιτικού μετασχηματισμού συναντάται. Στη συνέχεια παρατίθεται μια ενδεικτική εικόνα της μεταβολής της μικρογραφικής μορφής υποευτηκτοειδούς χάλυβα για διάφορες περιεκτικότητες σε άνθρακα. Ο υποευτηκτοειδής χάλυβας όπως είδαμε και από την εικόνα 1.2 του πρώτου κεφαλαίου, είναι ο χάλυβας του οποίου η περιεκτικότητα σε άνθρακα είναι μικρότερη από 0.8% ενώ οι φάσεις του χάλυβα οι οποίες συναντώνται είναι ο προευτηκτοειδής φερρίτης και περλίτης. Η εικόνα αυτή παρατίθεται για λόγους σύγκρισής της με τις εικόνες που θα παρουσιαστούν στη συνέχεια από τη μεταλλογραφική ανάλυση και τον προσεγγιστικό προσδιορισμό της περιεκτικότητας σε άνθρακα του ναυπηγικού χάλυβα ΑΗ36 που πραγματευόμαστε.

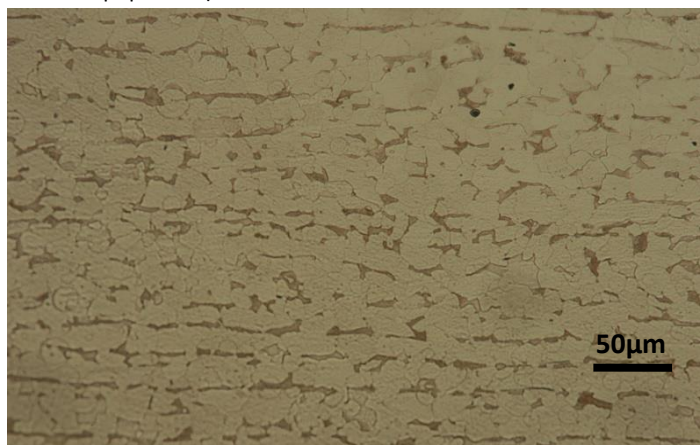


Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, από την ανωτέρω εικόνα επιβεβαιώνεται το γεγονός πως όσο αυξάνεται η περιεκτικότητα σε άνθρακα ενός χάλυβα (σκουρόχρωμες περιοχές) τόσο αυξάνεται και το ποσοστό περλιτικού μετασχηματισμού. Το συμπέρασμα αυτό θα το χρησιμοποιήσουμε στη συνέχεια με σκοπό τον προσδιορισμό των φάσεων του δεδομένου χάλυβα που παρατηρούμε από τη μεταλλογραφική ανάλυση.

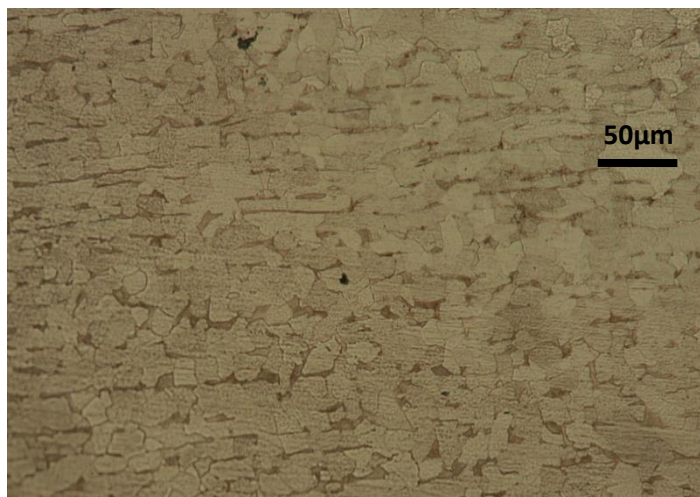
Σε πρώτη φάση παρουσιάζονται εικόνες του Δοκ1 (πλευρική επιφάνεια) για χρόνο έκθεσης σε Nital 3% 30 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 7.13: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση **x100**.



Εικόνα 7.14: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση **x200**.



Εικόνα 7.15: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση **x200**

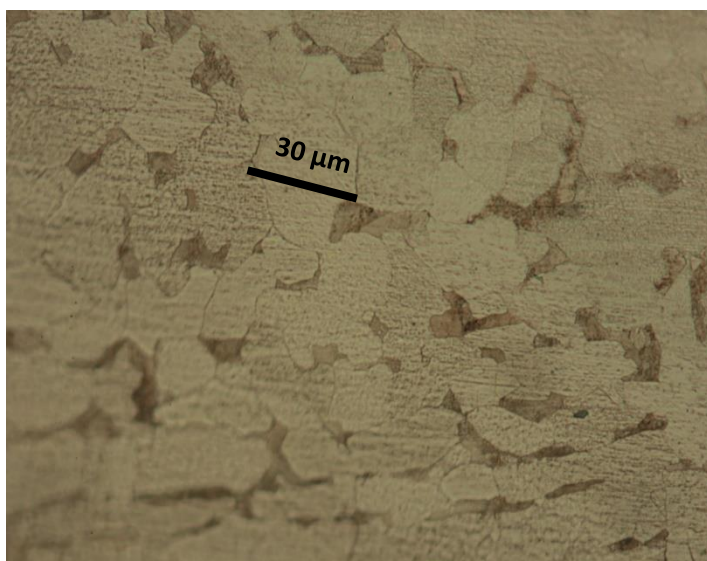
Και στις τρεις διπλανές εικόνες έχουμε εκθέσει την πλευρική επιφάνεια σε διάλυμα νιτρικού οξέος για τον ίδιο χρόνο έκθεσης και συγκεκριμένα για 30 s. Οι επιφάνειες που παρουσιάζονται είναι γειτονικές και αφορούν κεντρικό τμήμα της πλευρικής επιφάνειας ως προς την επιφάνεια κοπής που εξετάζουμε.

Το βασικό συμπέρασμα που μπορούμε να αποφανθούμε από τη μελέτη των τριών εικόνων είναι ότι οι κόκκοι του υλικού είναι ελαφρώς πεπλατυσμένοι, γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι πρόκειται για την πλευρική επιφάνεια του υλικού, αυτή δηλαδή που έχει και το μεγαλύτερο πλάτος συγκριτικά με την επιφάνεια κοπής από το ΕΡ. Σε αυτές τις φωτογραφίες αρχίζουμε και διακρίνουμε με σχετική δυσκολία τις φάσεις της μικροδομής του χάλυβα και συγκεκριμένα τους κόκκους φερριτικού μετασχηματισμού, οι οποίοι έχουν το χαρακτηριστικό λευκό χρώμα και καλύπτουν το μεγαλύτερο ποσοστό της επιφάνειας, πράγμα αναμενόμενο με βάση τη θεωρία.

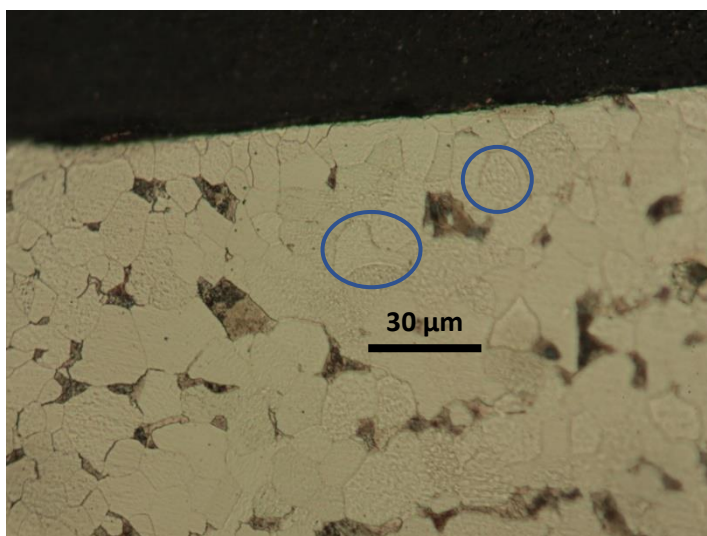
Στην **εικόνα 7.15** μάλιστα, με τη σχετική κλίμακα, παρατηρούμε ότι η διάμετρος ενός αρκετά πεπλατυσμένου κόκκου φερριτικού μετασχηματισμού είναι της τάξεως των 50 μm. Οι μαύρες περιοχές στο κάτω μέρος της **εικόνας 7.13** είναι τυχόν εγκλείσματα και υγρασία που έχουν απομείνει μετά τη χημική προσβολή με το Nital. Οι περιοχές αυτές έχουν επισημανθεί με μπλέ κύκλους.

Ένα ακόμη χρήσιμο οπτικό συμπέρασμα που προκύπτει από τη δεδομένη φωτογραφία είναι η διάταξη των κόκκων. Παρατηρούμε ότι υπάρχει μια γραμμικότητα στη διάταξη των κόκκων του χάλυβα, η οποία αποτυπώνεται από τις οριζόντιες λωρίδες που φαίνονται στη φωτογραφία. Όπως είδαμε, οι λωρίδες αυτές αποτυπώθηκαν κατά το στάδιο της χημικής προσβολής με Nital.





Εικόνα 7.16: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση  $\times 500$ .



Εικόνα 7.17: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση  $\times 500$ .

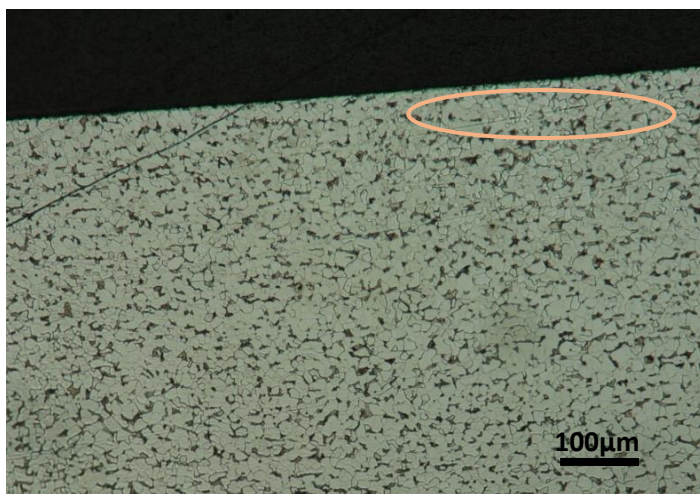
Η **εικόνα 7.16** πρόκειται για κεντρική περιοχή της επιφάνειας που μελετάμε, σε αντίθεση με την **εικόνα 7.17** όπου έχουμε μετατοπίσει την περιοχή εστίασης σε ακραία περιοχή της πλευρικής επιφάνειας.

Τόσο στην πρώτη όσο και στη δεύτερη εικόνα έχουν εντοπιστεί δύο από τους μεγαλύτερους κόκκους φερριτικού μετασχηματισμού οι οποίοι είναι της τάξεως των 30  $\mu\text{m}$ .

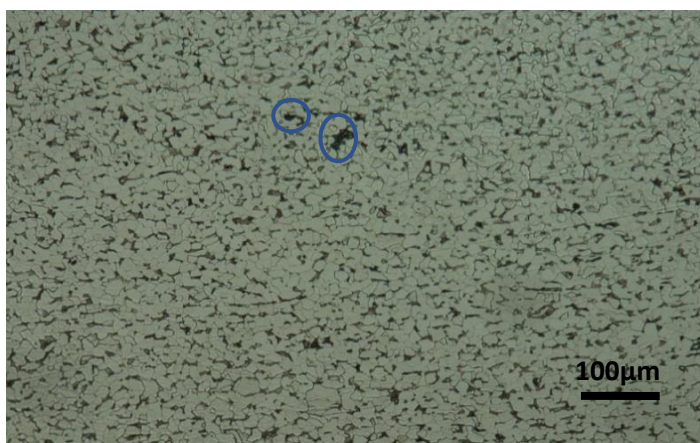
Παρατηρούμε κυρίως στην **εικόνα 7.17** που αντιστοιχεί σε ακραία περιοχή εστίασης, ότι ο πιο πεπλατυσμένος κόκκος που συναντάμε βρίσκεται προς το εσωτερικό της επιφάνειας και όχι στα σύνορα αυτής. Είναι προφανές πως όσο πιο πολύ προσεγγίζουμε την άκρη της πλευρικής επιφάνειας, τόσο η διάμετρος των κόκκων μειώνεται, ενώ ταυτόχρονα παρατηρείται μια αταξία ως προς τη διάταξή τους. Συγκεκριμένα, στο πάνω και αριστερά τμήμα της **εικόνας 7.17** είναι εμφανή τα όρια των κόκκων τα οποία και περικλείουν πολύ μικρότερη επιφάνεια στις άκρες από τα αντίστοιχα κεντρικά σημεία του χάλυβα. Προσεγγιστικά, το μέγεθος των κόκκων σε ακραία σημεία ανέρχεται στο 1/3 του μεγέθους των κόκκων συγκριτικά με τα κεντρικά τμήματα της επιφάνειας των χάλυβων, ενώ συγχρόνως στις ακραίες περιοχές παρατηρείται μια χαρακτηριστική αταξία της μικροδομής. Προφανώς από τις φωτογραφίες αυτές μπορούμε να βγάλουμε αρκετά ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τα σύνορα των κόκκων λόγω της υψηλής μεγέθυνσης που έχει πραγματοποιηθεί ( $\times 500$ ).

Τέλος, οι λευκές περιοχές αποτελούν περιοχές προευτηκτοειδούς φερριτικού μετασχηματισμού ενώ οι μαύρες περιοχές που εμφανίζονται αντιστοιχούν σε περλίτη με λεπτοφυή και τραχιά βελονοειδή διαστήματα. Στην **εικόνα 7.17** έχουν σημειωθεί με μπλε κύκλους ένας κόκκος φερριτικού (λευκό χρώμα) και ένας κόκκος περλιτικού (σκούρο χρώμα) μετασχηματισμού αντίστοιχα.

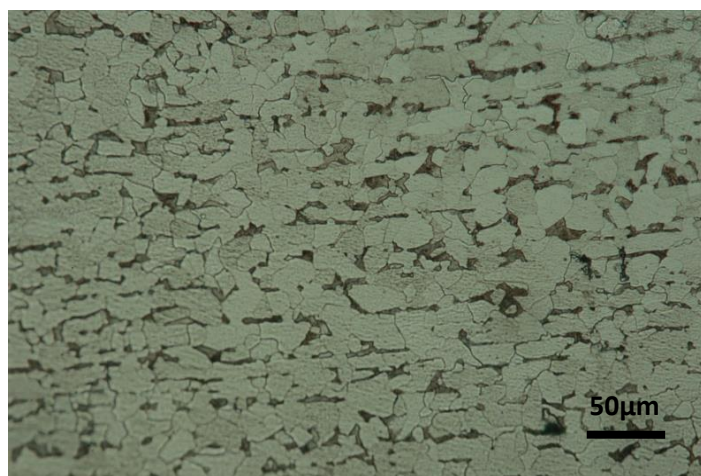
Στη συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες του Δοκ2 (επιφάνεια κοπής EP) για χρόνο έκθεσης σε Nital 3% 30 δευτερόλεπτα.



Εικόνα 7.18: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση x100.



Εικόνα 7.19: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση x100.



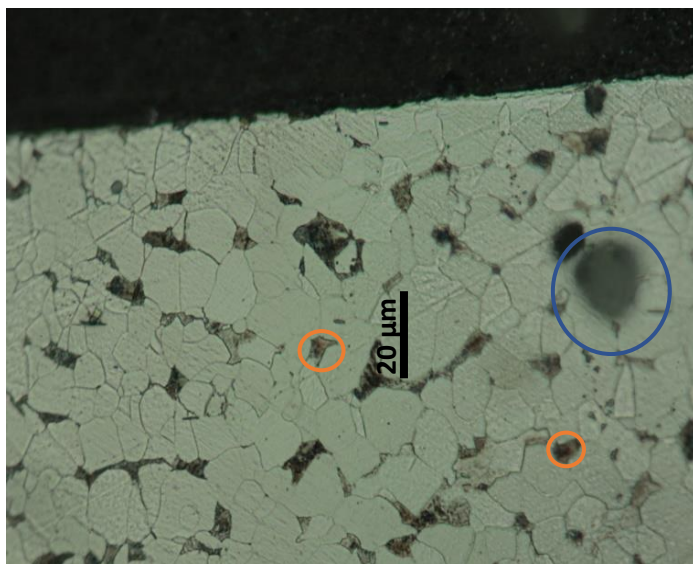
Εικόνα 7.20: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση x200.

Η **εικόνα 7.18**, πρόκειται για περιοχή της επιφάνειας κοπής του εργαλείου που βρίσκεται στην άκρη της επιφάνειας που μελετάμε.

Η μαύρη λωρίδα στο πάνω αριστερά τμήμα της **εικόνας 7.18** είναι πιθανόν κάποια ίνα υφάσματος από το λειαντικό φύλλο που χρησιμοποιήθηκε κατά τα τελικά στάδια της λείανσης και δεν απομακρύνθηκε μέσω του ultrasonic cleaning. Επίσης, με κατάλληλη εστίαση, μπορούμε να παρατηρήσουμε ένα μαύρο ίχνος που έχει αποτυπωθεί στο πάνω δεξιά τμήμα της **εικόνας 7.18** (έχει σημειωθεί πάνω στην εικόνα). Το ίχνος αυτό, πιθανόν να αντιστοιχεί σε κάποιο ανεπιθύμητο πέρασμα του λειαντικού τροχού, ο οποίος πιθανόν να «τραυμάτισε» το υλικό στο σημείο αυτό. Τέλος, από τις **εικόνες 7.18** και **7.19** μπορούμε προσεγγιστικά να διακρίνουμε διαφορετικές φάσεις στη μικροδομή, λόγω των διαφορετικών χρωματισμών, αλλά παρόλα αυτά δεν μπορούμε να εξάγουμε ασφαλή συμπεράσματα. Οι έντονα μαύρες περιοχές (κυρίως στο άνω κεντρικό τμήμα της **εικόνας 7.19**) πρόκειται για τυχόν εγκλείσματα και υγρασία που παρέμειναν μετά το στάδιο της χημικής προσβολής με το Nital. Οι περιοχές αυτές έχουν σημειωθεί με μπλε κύκλους.

Όσον αφορά την **εικόνα 7.20**, πρόκειται για κεντρική περιοχή της επιφάνειας που μελετάμε. Σε αυτή τη φωτογραφία αρχίζουμε και διακρίνουμε με σχετική δυσκολία τις φάσεις της μικροδομής και συγκεκριμένα τους κόκκους φερριτικού μετασχηματισμού, ωστόσο και πάλι δεν υπάρχει σχετική ακρίβεια, λόγω πιθανότατα μη ιδανικής χρονικά έκθεσης των επιφανειών στο Nital. Σε γενικές γραμμές μπορούμε να αποφανθούμε πως οι λευκές περιοχές αντιστοιχούν σε φερριτικό μετασχηματισμό, ενώ οι σκουρόχρωμες-μαύρες περιοχές αντιστοιχούν σε κόκκους περλιτικού μετασχηματισμού.



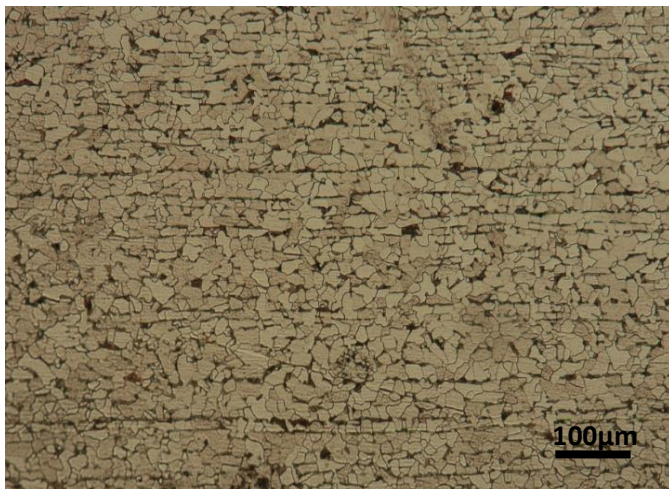


Εικόνα 7.21: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση  $\times 500$ .

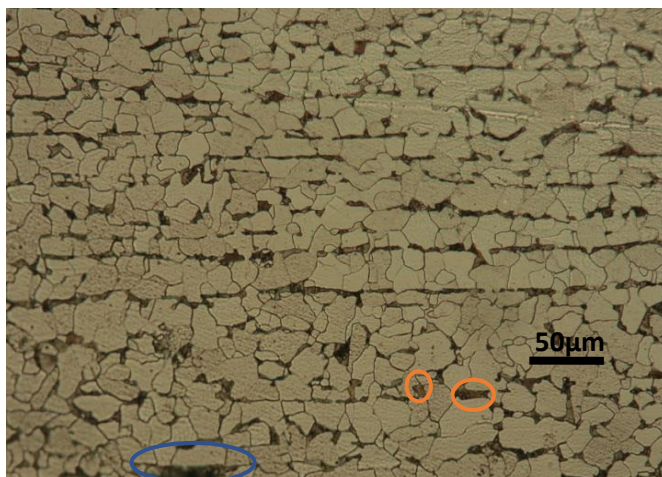
Η **εικόνα 7.21** πρόκειται για περιοχή που βρίσκεται στην άκρη της επιφάνειας που μελετάμε. Στη φωτογραφία αυτή παρατηρούμε ότι το μέγεθος των κόκκων στα άκρα της εξεταζόμενης επιφάνειας είναι μικρότερο από τις φωτογραφίες που είδαμε σε κεντρικές περιοχές του χάλυβα. Προσεγγιστικά, το μέγεθος των κόκκων σε ακραία σημεία ανέρχεται στο  $1/3$  του μεγέθους των κόκκων σε κεντρικά τμήματα της επιφάνειας των χαλύβων.

Στην εικόνα με τη χαρακτηριστική κλίμακα έχει σημειωθεί το μέγεθος ενός από τους μεγαλύτερους κόκκους φερριτικού μετασχηματισμού της τάξεως των  $20 \mu\text{m}$ . Οι λευκές περιοχές αποτελούν περιοχές προευτηκτοειδούς φερριτικού μετασχηματισμού ενώ οι μαύρες περιοχές που εμφανίζονται αντιστοιχούν σε περλίτη με λεπτοφυή και τραχιά βελονοειδή διαστήματα. Επιπλέον, στο άνω δεξιό τμήμα της φωτογραφίας διακρίνεται με σκούρο χρώμα το αποτύπωμα που άφησε πίσω του το σφαιρίδιο της ψηματοβολής κατά την πρόσκρουσή του στο μέταλλο και δεν εξαφανίστηκε κατά το στάδιο της λείανσης, λόγω πιθανόν του μεγάλου βάθους εισχώρησης. Τέλος, παρατηρούνται διάσπαρτες πορτοκαλί-κίτρινες κηλίδες πολύ μικρής έκτασης οι οποίες το πιθανότερο να παραπέμπουν στην έναρξη της διάβρωσης του μετάλλου λόγω έκθεσης στον ατμοσφαιρικό αέρα. Το αποτύπωμα του σφαιριδίου αποτυπώνεται με μπλε κύκλο, ενώ οι πιο εμφανείς οξειδωμένες περιοχές με πορτοκαλί.

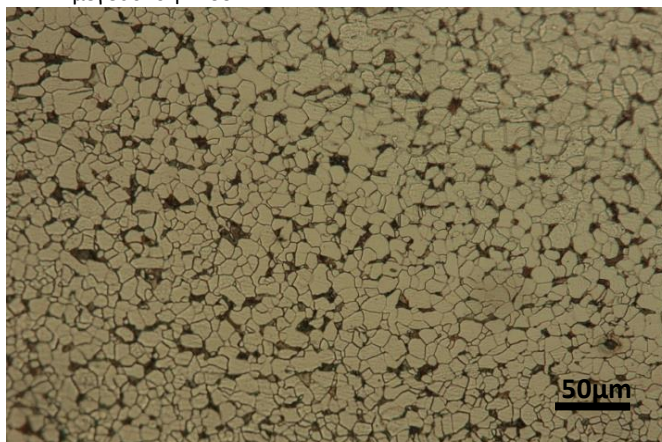
Στη συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες του Δοκ1 (πλευρική επιφάνεια) για χρόνο έκθεσης σε Nital 3% (30+20) δευτερόλεπτα.



Εικόνα 7.22: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση x100.



Εικόνα 7.23: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση x200.



Εικόνα 7.24: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση x200.

Και στις τρεις διπλανές εικόνες έχουμε εκθέσει την πλευρική επιφάνεια σε διάλυμα νιτρικού οξέος για τον ίδιο χρόνο έκθεσης και συγκεκριμένα για (30+20) s. Είναι εμφανής η διαφορά της φωτεινότητας που παρατηρείται ανάμεσα στις διπλανές εικόνες σε σχέση με τις εικόνες **7.14**, **7.15**, **7.16**, οι οποίες αναφέρονται ακριβώς στις ίδιες περιοχές της πλευρικής επιφάνειας του υλικού.

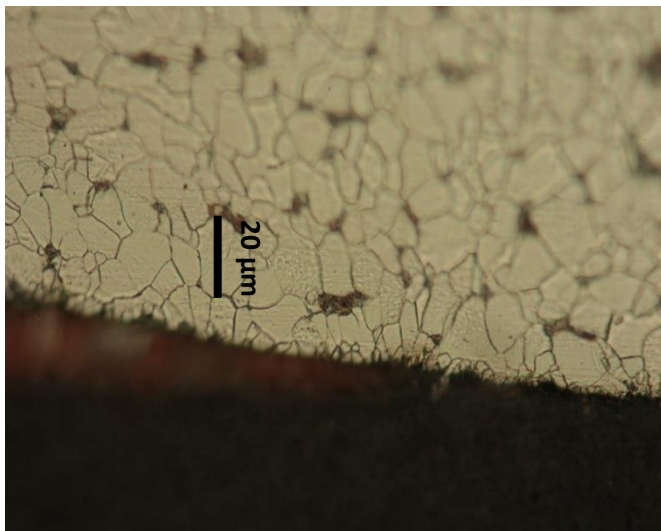
Οι εικόνες **7.22**, **7.23**, **7.24** παρουσιάζουν πολύ πιο ευκρινώς τα όρια των κόκκων. Σε κάθε περίπτωση, είναι φανερό, ότι οι κόκκοι είναι ελαφρώς πεπλατυσμένοι γεγονός που ενισχύει την άποψη ότι πρόκειται για την πλευρική επιφάνεια του υλικού, αυτή δηλαδή που έχει και το μεγαλύτερο πλάτος.

Σε αντίθεση με τις εικόνες **7.14**, **7.15**, **7.16**, λόγω της προσβολής του υλικού για μεγάλο σχετικά χρόνο έκθεσης, αρχίζουμε και διακρίνουμε τις φάσεις περλιτικού μετασχηματισμού των κόκκων, οι οποίες αποτυπώνονται με το χαρακτηριστικό σκούρο γκρι και μαύρο χρώμα.

Και στις τρεις διπλανές εικόνες, έχει σημειωθεί η σχετική κλίμακα, μέσω της οποίας μπορούμε να αποφανθούμε σχετικά με το μέγεθος των κόκκων. Στο κάτωτερο τμήμα της εικόνας 7.23, υπάρχει μια περιοχή με γκρι χρώμα, η οποία λόγω του πολύ μεγάλου μεγέθους σε σχέση με τους γειτονικούς κόκκους, πιθανώς αναφέρεται σε τυχόν εγκλείσματα και υγρασία που έχουν απομείνει μετά τη χημική προσβολή με το Nital. Η περιοχή αυτή έχει σημειωθεί με μπλε κύκλο ενώ με πορτοκαλί έχουν σημειωθεί «κηλίδες» πορτοκαλί χρώματος, οι οποίες παραπέμπουν σε περιοχές οξειδωμένες λόγω έκθεσης του υλικού στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Τέλος παρατηρούμε ότι υπάρχει μια γραμμικότητα στη διάταξη των κόκκων του χάλυβα, η οποία αποτυπώνεται από τις οριζόντιες λωρίδες στην εικόνα 7.23.





Εικόνα 7.25: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα ΑΗ36 σε μεγέθυνση  $\times 500$ .

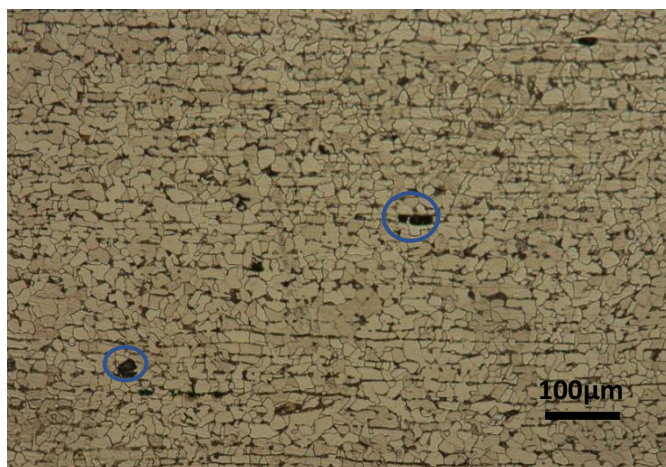
Πρόκειται για περιοχή που βρίσκεται στην άκρη της επιφάνειας που μελετάμε. Στην **εικόνα 7.25** αυτή παρατηρούμε ότι το μέγεθος των κόκκων στα άκρα της εξεταζόμενης επιφάνειας είναι μικρότερο από τις φωτογραφίες που είδαμε σε κεντρικά τμήματα του χάλυβα ενώ συγχρόνως στο κάτω τμήμα της εικόνας παρατηρείται μια χαρακτηριστική αταξία των κόκκων.

Επιπρόσθετα, οι κόκκοι φαίνονται να είναι πιο πεπλατυσμένοι στα άκρα, γεγονός που επιβεβαιώνει πως βρισκόμαστε σε πλευρική επιφάνεια, σε περιοχή δηλαδή όπου το πλάτος των κόκκων είναι αισθητά μεγαλύτερο από την άλλη του διάσταση.

Οι λευκές περιοχές αποτελούν περιοχές προευτηκτοειδούς φερριτικού μετασχηματισμού ενώ οι μαύρες περιοχές που εμφανίζονται αντιστοιχούν σε περλίτη με λεπτοφυή και τραχιά βελονοειδή διαστήματα.

Τέλος, για λόγους πληρότητας, έχει εντοπιστεί και σημειωθεί ένας από τους μεγαλύτερης διαμέτρου κόκκους της συγκεκριμένης επιφάνειας την οποία μελετάμε, με διάμετρο της τάξεως των 20 μm όπως φαίνεται και από την διπλανή εικόνα.

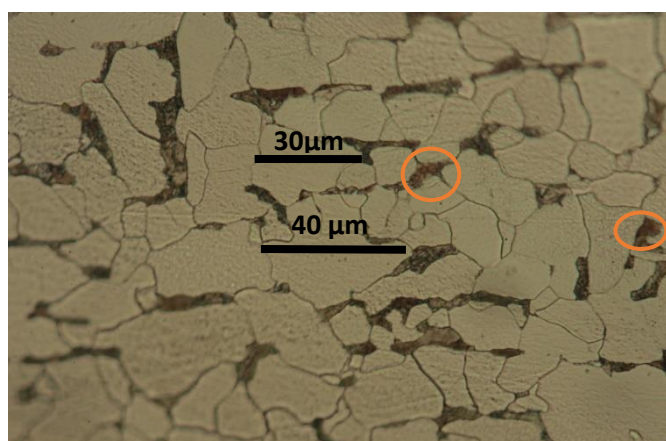
Στη συνέχεια παρουσιάζονται εικόνες του Δοκ2 (επιφάνεια κοπής EP) για χρόνο έκθεσης σε Nital 3% (30+20) δευτερόλεπτα.



Εικόνα 7.26: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση x100.



Εικόνα 7.27: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση x200



Εικόνα 7.28: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση x500.

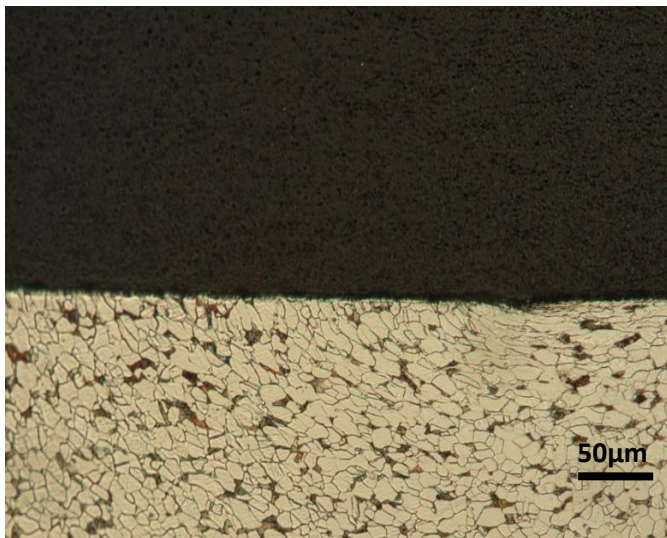
Οι εικόνες 7.26, 7.27, 7.28 αντιστοιχούν σε κεντρική περιοχή της επιφάνειας που μελετάμε. Το οπτικό αποτέλεσμα είναι ιδιαίτερα καθαρό καθώς η έκθεση στο διάλυμα νιτρικού οξέος είναι πιθανόν η ιδανική σε αντίθεση με τη εικόνα 7.19 που αντιστοιχεί στην ίδια περιοχή της επιφάνειας του Δοκ2.

Οι μαύρες κηλίδες στο κεντρικό τμήμα της εικόνας 7.26 είναι πιθανόν κάποια εγκλείσματα ή υγρασία που παρέμειναν μετά το πέρας της χημικής προσβολής με Nital και δεν απομακρύνθηκαν. Τα χαρακτηριστικά στίγματα έχουν σημειωθεί στην εικόνα 7.26 σε μπλε κύκλο

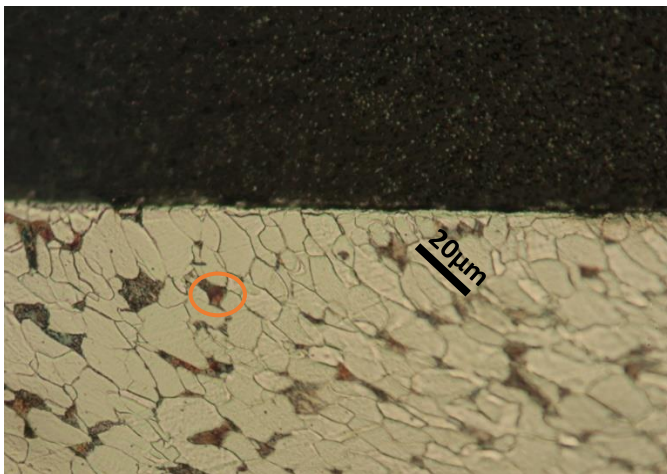
Παρατηρούμε από τις εικόνες 7.26,7.27,7.28 ότι υπάρχει γραμμικότητα στη διάταξη των κόκκων του χάλυβα, η οποία αποτυπώνεται από την οριζόντια κατανομή των κόκκων όπως φαίνεται στη φωτογραφία. Το συγκεκριμένο οπτικό συμπέρασμα ήταν ευδιάκριτο ακόμα και στην εικόνα 7.20 όπου η χημική προσβολή με Nital ήταν μικρότερης διάρκειας.

Σε κάθε μια από τις ανωτέρω εικόνες έχει σημειωθεί η σχετική κλίμακα. Μάλιστα, στην εικόνα 7.28 έχουν εντοπιστεί δύο από τους μεγαλύτερους κόκκους φερριτικού μετασχηματισμού των οποίων η διάμετρος είναι της τάξεως των 30 και 40 μm. Παρατηρούμε ότι οι κόκκοι αυτοί δεν είναι ιδιαίτερα πεπλατυσμένοι, γεγονός που επιβεβαιώνει πως βρισκόμαστε στην επιφάνεια κοπής από το κοπτικό EP και όχι σε πλευρική επιφάνεια του δοκιμίου.

Τέλος, στην εικόνα 7.28 έχουν σημειωθεί με πορτοκαλί κύκλους, περιοχές με χαρακτηριστικό πορτοκαλί χρώμα, οι οποίες πιθανότατα αντιστοιχούν σε περιοχές που έχουν οξειδωθεί λόγω της έκθεσης της καθρεπτισμένης επιφάνειας στον ατμοσφαιρικό αέρα.



Εικόνα 7.29: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση  $\times 200$ .



Εικόνα 7.30: Φωτογραφία ναυπηγικού χάλυβα AH36 σε μεγέθυνση  $\times 500$ .

Στις **εικόνες 7.29 και 7.30** έχουμε εστιάσει σε ακραίες περιοχές του Δοκ2 της επιφάνειας που έχει κοπεί με χρήση κοπτικού ΕΡ.

Παρατηρούμε πως όσο απομακρυνόμαστε από τις κεντρικές περιοχές, τόσο το μέγεθος των κόκκων μειώνεται. Πιο συγκεκριμένα, στην **εικόνα 7.28** η διάμετρος του μεγαλύτερου κόκκου που έχει σημειωθεί είναι της τάξεως των 40 μm ενώ στην **εικόνα 7.30** είναι της τάξεως των 20 μm. Επίσης, όπως έχει ήδη επισημανθεί, στις ακραίες περιοχές, επικρατεί και χαρακτηριστική αταξία στη διάταξη των κόκκων.

Στην **εικόνα 7.30** έχει σημειωθεί με πορτοκαλί κύκλο μια περιοχή, η οποία έχει υποστεί οξείδωση λόγω της έκθεσης στον ατμοσφαιρικό αέρα.

Τέλος, στις **εικόνες 7.29 και 7.30** μπορούμε να αποφανθούμε με σχετική ευκολία τις περιοχές της χαρακτηριστικής μικροδομής του χάλυβα που μελετάμε. Πιο συγκεκριμένα, οι λευκές περιοχές αποτελούν περιοχές προευτηκτοειδούς φερριτικού μετασχηματισμού ενώ οι μαύρες περιοχές που εμφανίζονται αντιστοιχούν σε περλίτη με λεπτοφυή και τραχιά βελονοειδή διαστήματα.

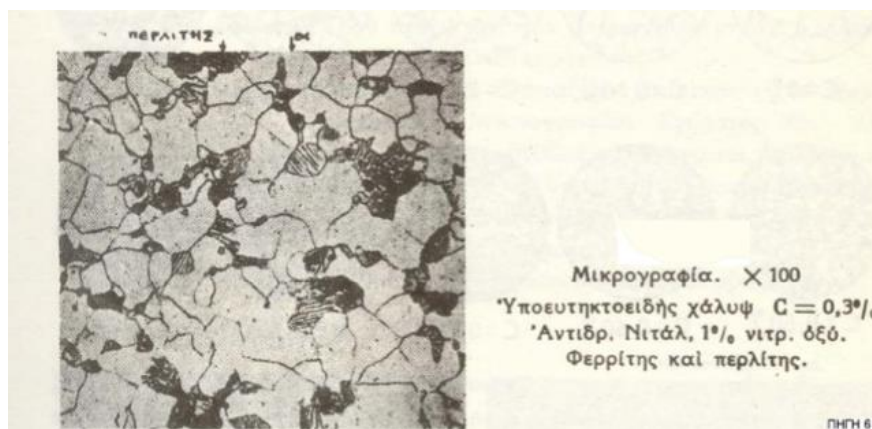


## 7.9 Παρατηρήσεις – Συμπεράσματα<sup>29</sup>



Εικόνα 7.31: Μικροδομή υποευτηκτοειδούς κοινού χάλυβα. [49]

Οι φωτογραφίες που αναλύθηκαν ανωτέρω ομοιάζουν αρκετά με την παραπάνω εικόνα 7.31 στην οποία αναφέρεται ότι το υλικό που απεικονίζεται εκεί είναι κοινός χάλυβας ο οποίος ωστενιτοποιήθηκε στους 845 °C, ψύχθηκε στους 650 °C, αφέθηκε για μια ώρα σε ισοθερμικό μετασχηματισμό και στη συνέχεια ψύχθηκε σε θερμοκρασία δωματίου. Οι λευκές περιοχές είναι φερρίτης και οι γκρι και μαύρες περιοχές περλίτης με λεπτοφυή και τραχιά βελονοειδή διαστήματα. Στην φωτογραφία αυτή η χημική προσβολή της εξεταζόμενης επιφάνειας του δοκιμίου έχει γίνει με Nital. Παρατηρούμε ότι υπάρχουν αρκετά κοινά στοιχεία του ανωτέρω κοινού χάλυβα με το ναυπηγικό χάλυβα ΑΗ36 του οποίου εξετάσαμε τη μικροδομή.



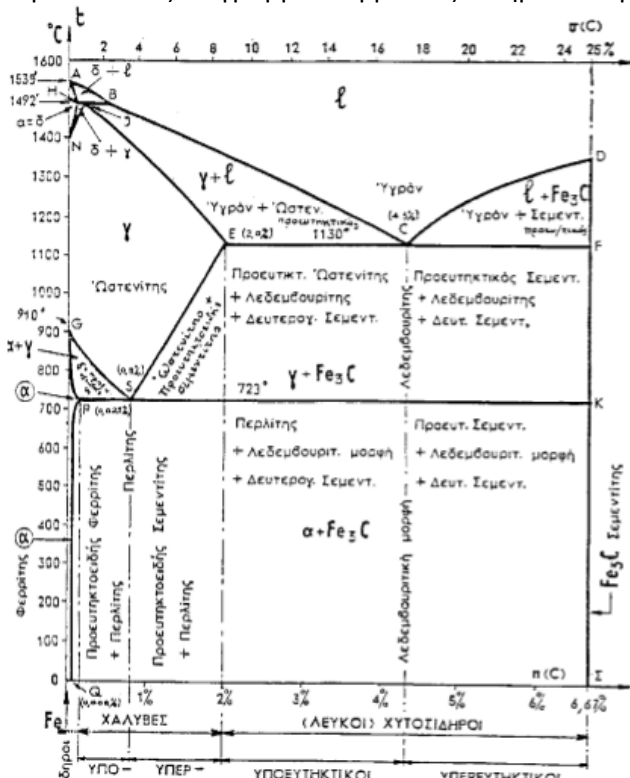
Εικόνα 7.32: Υποευτηκτοειδής χάλυβας περιεκτικότητα 0.3% σε άνθρακα. [49]

[49]<sup>29</sup> [https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-3.2\\_A.Tsouknidas.pdf](https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-3.2_A.Tsouknidas.pdf)

[50] [https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-2.2\\_A.Tsouknidas.pdf](https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-2.2_A.Tsouknidas.pdf)

Οι ίδιες φωτογραφίες του χάλυβα ομοιάζουν αρκετά με την φωτογραφία 7.28, στην οποία όπως φαίνεται, οι μαύρες περιοχές είναι περλίτης και οι άσπρες φερρίτης.

Όλα αυτά μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο χάλυβας που εξετάζεται στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι περιεκτικότητας σε άνθρακα 0,2% - 0,3% και ανήκει στην κατηγορία των υποευτηκτοειδών χαλύβων, όπου οι λευκές περιοχές που εμφανίζονται είναι φάσεις φερρίτη και οι μαύρες φάσεις περλίτη, σύμφωνα και με το μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου-άνθρακα το οποίο αναφέρει ότι μέχρι την ευτηκτοειδή σύσταση, που βρίσκεται στο 0,8% περιεκτικότητας άνθρακα και ο χάλυβας αποτελείται μόνο από περλίτη, μπορούμε να έχουμε μόνο προευτηκτοειδή φερρίτη και περλίτη. Στη συνέχεια παρατίθεται το μετασταθές διάγραμμα ισορροπίας σιδήρου-άνθρακα.



Εικόνα 7.33: Μετασταθές διάγραμμα σιδήρου-άνθρακα [6]

## 8. Πείραμα εμφάνισης σε λουτρό NaCl

Η γενική αρχή της μεθόδου διάβρωσης σε λουτρό χλωριούχου νατρίου περιγράφηκε στο θεωρητικό κομμάτι. Εκεί παραθέσαμε τις βασικές αρχές, τη διάταξη του συστήματος εμφάνισης σε λουτρό NaCl καθώς και τον τρόπο με τον οποίο ουσιαστικά θέσαμε σε λειτουργία το συγκεκριμένο μηχανισμό διάβρωσης για την εκτέλεση του πειραματικού μέρους το οποίο παρουσιάζεται στη συνέχεια. Επιπρόσθετα, τονίστηκαν τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται το λουτρό εμφάνισης και ποιά η χρησιμότητά τους στο κύκλωμα. Στο κεφάλαιο αυτό θα παραθέσουμε πειραματικά στοιχεία, πειραματικές καμπύλες και πειραματικά αποτελέσματα διάβρωσης των δοκιμίων ναυπηγικού χάλυβα AH36, τα οποία στη συνέχεια θα σχολιαστούν και θα προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία του χάλυβα έναντι διάβρωσης από το θαλάσσιο περιβάλλον.

Το πείραμα εμφάνισης σε λουτρό NaCl χαρακτηρίζεται ως ιδιαίτερα απλό και εύκολα υλοποιήσιμο, ενώ συγχρόνως τα πειραματικά του αποτελέσματα είναι ιδιαίτερα κατανοητά ώστε να προκύψουν σαφή συμπεράσματα για το συγκεκριμένο μηχανισμό διάβρωσης. Έχει

ως σκοπό τη μελέτη της διάβρωσης του υλικού όταν αυτό βρίσκεται σε θαλάσσιο περιβάλλον. Η διάβρωση που προκαλείται είναι σχετικά ήπιας μορφής και εξελίσσεται αργά, δεδομένου ότι οι συνθήκες που πραγματοποιείται είναι οι θεωρητικά «ιδανικές», καθώς το διαβρωτικό περιβάλλον παραμένει σταθερό με το χρόνο (διατήρηση του διαλύματος NaCl σε σταθερή τιμή και συγκεκριμένα 3.5% ). Ταυτόχρονα, η απουσία τυρβώδους ανέμου καθώς και η σταθερή θερμοκρασία που επικρατεί σε γενικές γραμμές εντός του χώρου που διεξάγεται η πειραματική διαδικασία χάρη στον εναλλάκτη θερμότητας που βρίσκεται σε συνεχή λειτουργία, καθιστά το ρυθμό διάβρωσης χαμηλό και την επικινδυνότητα αστοχίας του υλικού εξαιρετικά μικρή. Βασικό μέλημα της συγκεκριμένης πειραματικής διαδικασίας είναι η παραγωγή καμπυλών απώλειας μάζας προς επιφάνεια διάβρωσης ως προς το χρόνο έκθεσης των δοκιμών ναυπηγικού χάλυβα. Προφανώς, η απώλεια μάζας θα κυμαίνεται σε χαμηλότερα επίπεδα σε σχέση με τις πραγματικές συνθήκες διάβρωσης για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω, ωστόσο οι χρόνοι κατά τους οποίους επιτεύχθηκε το μεγαλύτερο «άλμα διάβρωσης» είναι ενδεικτικοί και αντικατοπτρίζουν τις πραγματικές συνθήκες.

Από όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, μπορεί να εξαχθεί το συμπέρασμα ότι το πείραμα αυτό δεν προσομοιάζει επακριβώς τη συμπεριφορά των χαλύβδινων ελασμάτων και μηχανολογικών εξαρτημάτων ενός πλοίου σε συνθήκες εργασίας, όμως είναι πολύ σημαντικό να πραγματοποιηθεί αυτή η πειραματική διαδικασία ώστε να δώσει αποτελέσματα που θα μπορούν να συγκριθούν και με άλλες συνθήκες έκθεσης για τη συμπεριφορά του υλικού σε αυτές. Πιο συγκεκριμένα τα κατασκευαστικά μέρη του πλοίου που βρίσκονται κάτω από τη στάθμη της θάλασσας προστατεύονται με συνδυασμό μεθόδων. Για παράδειγμα τα εξωτερικά ελάσματα της γάστρας είναι πάντοτε προστατευμένα με ισχυρές επιστρώσεις ώστε ο χάλυβας να μην έρχεται σε άμεση επαφή με το θαλασσινό νερό, ενώ υπάρχουν και οι θυσιαζόμενες άνοδοι που επιβραδύνουν τους ρυθμούς διάβρωσης. Το ίδιο συμβαίνει και σε εσωτερικά ελάσματα, όπως οι δεξαμενές έρματος που περιστασιακά γεμίζουν με θαλασσινό νερό. Η έλικα συνήθως προστατεύεται με σύστημα καθοδικής προστασίας όπως και διάφοροι αγωγοί θαλασσινού ύδατος. Ένας ακόμα λόγος για τον οποίο το πείραμα της εμβάπτισης δεν προσομοιάζει επακριβώς τις συνθήκες λειτουργίας ελασμάτων του πλοίου είναι ότι το διάλυμα του πειράματος είναι αφενός στάσιμο και αφετέρου πεπερασμένης μάζας σε αντίθεση με το θαλασσινό νερό.

## 8.1 Διάταξη πειράματος εμβάπτισης δοκιμών μικρών διαστάσεων για μελέτη απώλειας μάζας

Τα αρχικά χαλύβδινα δοκίμια διαστάσεων 300x15x6.5 [mm] κόπηκαν με χρήση σέγας σε απόσταση 40 mm από τα άκρα. Έτσι προέκυψαν τα τελικά χαλύβδινα δοκίμια διαστάσεων 220x15x6.5 [mm] τα οποία μελετήθηκαν ως προς τη μεταβολή των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Τα “κομμάτια” που απέμειναν, συνολικών διαστάσεων **40x15x6.5** [mm] στο εξής θα αναφέρονται ως δοκίμια μικρών διαστάσεων και χρησιμοποιήθηκαν ώστε να υπολογίσουμε στη συνέχεια το ρυθμό απώλειας μάζας προς την επιφάνεια διάβρωσης σε σχέση με το χρόνο έκθεσης.

Για το πείραμα της εμβάπτισης των χαλύβδινων δοκιμών μικρών διαστάσεων χρησιμοποιήθηκαν αυτοσχέδιες διατάξεις. Πιο συγκεκριμένα, χρησιμοποιήθηκε ένα ορθογώνιο δοχείο και πάνω σε αυτό αναρτήθηκαν ελεύθεροι ογκομετρικοί κύλινδροι. Με τη βοήθεια ειδικού σπάγκου (ανοξειδωτού), τα δοκίμια δέθηκαν πάνω στους ογκομετρικούς

κυλίνδρους με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει απόσταση μεταξύ τους και να μην έρχονται σε επαφή, ενώ ήταν πολύ σημαντικό να βρίσκονται πλήρως καλυμμένα από το διάλυμα NaCl 3.5% και χωρίς φυσικά να ακουμπούν στον πυθμένα του δοχείου ώστε να επιτυγχάνεται συνεχής διάβρωση των δοκιμίων. Για την εξασφάλιση σταθερών συνθηκών θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του πειράματος έγινε χρήση συσκευής που θέρμινει απιονισμένο νερό σε θερμοκρασία 30°C. Αυτό κυκλοφορεί μέσω σωληνώσεων και θερμαίνει το νερό που περιέχεται στη λεκάνη όπου τοποθετήθηκε το δοχείο με το διάλυμα NaCl και τα δοκίμια. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως τα δοκίμια χωρίς αστάρι, καθώς και τα δοκίμια με αστάρι θα έπρεπε να τοποθετούνταν σε διαφορετικά δοχεία, ώστε ο ρυθμός διάβρωσης της μιας κατηγορίας δοκιμίων (με αστάρι) να ήταν ανεξάρτητος από το ρυθμό διάβρωσης των δοκιμίων χωρίς αστάρι. Πιο συγκεκριμένα, τα δοκίμια με αστάρι περιέχουν φωσφορικό ψευδάργυρο, ο οποίος απομακρύνεται σταδιακά από την επιφάνεια των δοκιμίων και μεταφέρεται μέσω του διαλύματος NaCl που είναι βυθισμένα. Έτσι, τυχόν ανάμιξη των δύο ειδών δοκιμίων στο ίδιο δοχείο θα επέφερε σημαντικές μεταβολές στους ρυθμούς διάβρωσης των δοκιμίων χωρίς αστάρι, πράγμα το οποίο θέλαμε εξ' αρχής να αποφύγουμε. Στη συνέχεια παρατίθεται μια εικόνα ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η συνολική διάταξη του λουτρού εμβάπτισης για τα δοκίμια μικρών διαστάσεων που κόψαμε με σκοπό τη μελέτη του φαινομένου διάβρωσης και την επίδρασή του στο ρυθμό απώλειας μάζας του ναυπηγικού χάλυβα AH36 που μελετάμε.



Εικόνα 8.1: Πειραματική διάταξη εμβάπτισης δοκιμίων μικρών διαστάσεων

## 8.2 Εκτέλεση πειράματος εμβάπτισης δοκιμίων μικρών διαστάσεων

Τα δοκίμια τα οποία εκτέθηκαν στο πείραμα εμβάπτισης χωρίστηκαν σε 2 μεγάλες κατηγορίες ανάλογα την προεργασία που είχε προηγηθεί πριν αυτά αρχίσουν να διαβρώνονται στο λουτρό εμβάπτισης. Έτσι, προέκυψαν τα δοκίμια εκείνα τα οποία απλώς κόπηκαν με τη χρήση σέγας, στο εξής θα αναφέρονται ως δοκίμια μικρών διαστάσεων με αστάρι, καθώς και τα δοκίμια εκείνα τα οποία μετά την κοπή από τη σέγα,



ψηγματοβολήθηκαν και στη συνέχεια μονώθηκαν κατάλληλα περιμετρικά με χρήση ακρυλικού διαλύματος καθώς και επικάλυψη με κερί. Τα τελευταία στο εξής θα αναφέρονται ως δοκίμια μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι. Επειδή η μάζα τους είναι σχετικά μεγάλη ενώ ο αναμενόμενος ρυθμός διάβρωσης μικρός, λόγω των συνθηκών διάβρωσης που αναφέρθηκαν στην προηγούμενη ενότητα, κρίθηκε σκόπιμο να εκτεθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Με βάση πρότυπα έκθεσης χαλύβδινων δοκιμίων σε συνθήκες θαλάσσιας διάβρωσης, αποφασίστηκε οι χρόνοι έκθεσης να είναι καθορισμένοι σε ημέρες και πιο συγκεκριμένα στα ακόλουθα 4 χρονικά διαστήματα:

1. 0 – 20 ημέρες έκθεσης
2. 20 – 40 ημέρες έκθεσης
3. 40 – 60 ημέρες έκθεσης
4. 60 – 75 ημέρες έκθεσης

Τη χρονική στιγμή «0» θεωρούμε ότι τα δοκίμια τα οποία διαθέτουμε για να ξεκινήσουν την έκθεσή τους στο λουτρό εμβάπτισης είναι εντελώς αδιάβρωτα, αμελούμε δηλαδή ακόμη και ενδεχόμενο διάβρωσης λόγω έκθεσης στον ατμοσφαιρικό αέρα. Συνεπώς, η απώλεια μάζας των δοκιμίων μικρών διαστάσεων για χρόνο «0» θα είναι προφανώς μηδέν.

Η θερμοκρασία του διαλύματος χλωριούχου νατρίου ελεγχόταν τακτικά και οι απώλειες νερού όσμωσης από εξάτμιση αναπληρώνονταν όποτε ήταν απαραίτητο. Να σημειωθεί πως οι απώλειες του διαλύματος NaCl ήταν ελάχιστες λόγω της τοποθέτησης κατάλληλης διαφανούς ζελατίνης στο άνω μέρος του ορθογωνίου δοχείου, διατηρώντας έτσι παράλληλα τις συνθήκες διάβρωσης σταθερές όπως επισημάνθηκε και στην προηγούμενη ενότητα.

Μετά το πέρας κάθε απαιτούμενου χρονικού διαστήματος έκθεσης στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου, τα δοκίμια απομακρύνονταν από το δοχείο, καθαρίζονταν με νερό όσμωσης και ειδικούς σπόγγους ώστε να απομακρυνθούν τα επιφανειακά οξείδια και προϊόντα διάβρωσης τα οποία επικάθονταν στην επιφάνειά τους. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετούνταν σε κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο στεγνώματος για κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα, με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας και διαφόρων εγκλεισμάτων στην πορώδη επιφάνειά τους. Σε περίπτωση που δεν γινόταν πλήρης απομάκρυνση της υγρασίας, εγκυμονούσε ο κίνδυνος περαιτέρω οξείδωσης λόγω των ιδιαίτερα ευνοϊκών συνθηκών διάβρωσης που θα αναπτύσσονταν στη χαρακτηριστική τριεπιφάνεια μέταλλο-νερό-αέρας.

Τα δοκίμια μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι, τα οποία είχαν μονωθεί με ακρυλικό διάλυμα και κερί στις περιφερειακές τους επιφάνειες, μετά το στέγνωμα, υπέστησαν τη διαδικασία του χημικού καθαρισμού με σκοπό την πλήρη απομάκρυνση των προϊόντων οξείδωσης τα οποία επικάθονταν στις επιφάνειές τους και ήταν αδύνατο να απομακρυνθούν πλήρως μέσω της πλύσης με το νερό όσμωσης. Πριν το χημικό καθαρισμό προηγήθηκε η έκθεση των δοκιμίων σε διάλυμα ακετόνης με σκοπό την απομάκρυνση τυχόν μονωτικού υλικού (κεριού) το οποίο είχε παραμείνει τόσο στις προστατευόμενες επιφάνειες όσο και στις μη, λόγω της μερικής διάλυσης που υπέστη εντός των δοχείων του λουτρού εμβάπτισης και της επικάλυψης των επιφανειών των δοκιμίων.

Μετά το χημικό καθαρισμό των ψηγματοβολημένων δοκιμίων, ακολουθεί κατά τα γνωστά η διαδικασία του στεγνώματος ώστε να απομακρυνθούν εγκλείσματα υγρασίας, τα οποία καταλαμβάνουν πορώδη τμήματα των επιφανειών και οδηγούν σε σταδιακή υποβάθμιση της ποιότητάς τους, ενώ συγχρόνως μεταβάλλουν τη μάζα τους λόγω της περαιτέρω οξείδωσης που πραγματοποιούν.

Μετά την ολοκλήρωση του στεγνώματος των δοκιμίων, ακολουθούσε η ζύγισή τους και κατ'επέκταση, η εύρεση της απώλειας μάζας. Για την πληρότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων, κρίθηκε σκόπιμος ο υπολογισμός των επιφανειών διάβρωσης των δοκιμίων με χρήση ηλεκτρονικού παχυμέτρου, ενώ συγχρόνως υπολογίστηκε ο λόγος της απώλειας μάζας προς τη συνολική επιφάνεια διάβρωσης. Με τον τρόπο αυτό, τα πειραματικά μας αποτελέσματα είναι πιο ρεαλιστικά καθώς μας δίνουν συμπεράσματα σχετικά με την ποσοστιαία απώλεια μάζας των δοκιμίων και όχι απλώς την απώλεια μάζας.

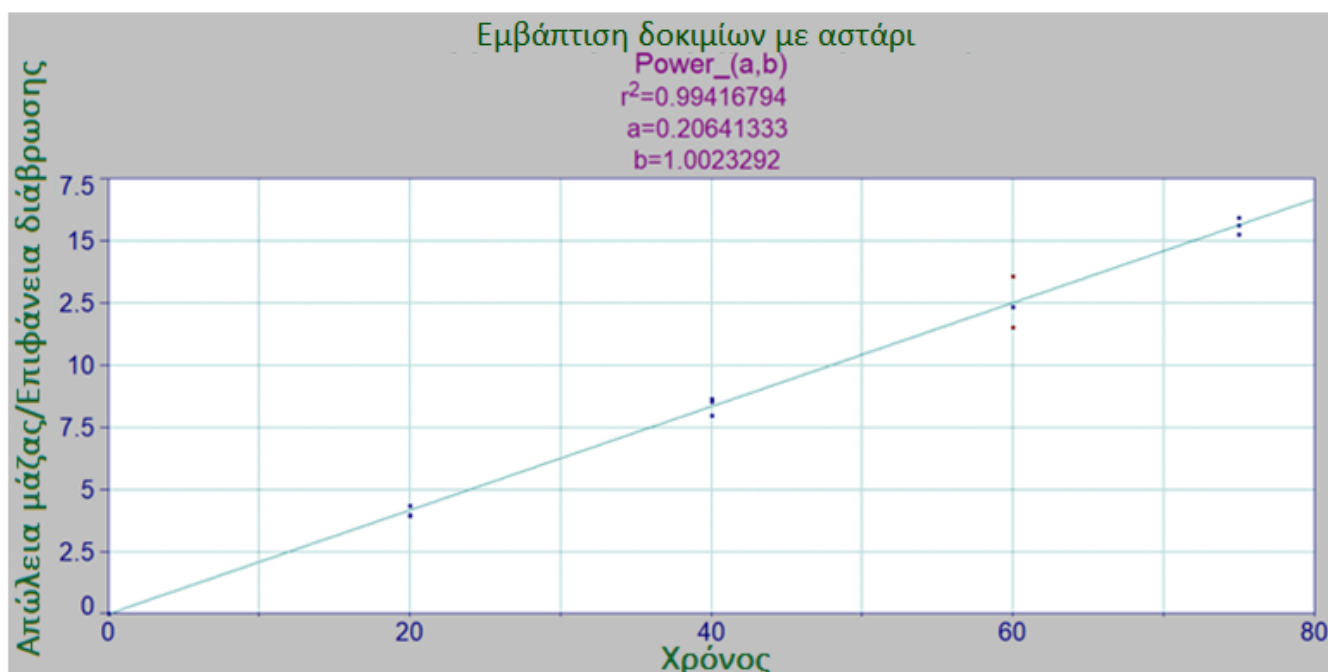
Ακολουθεί αναλυτικός πίνακας όπου παρουσιάζεται η αρχική μάζα, η μάζα μετά την έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον και την απομάκρυνση των οξειδίων, η απώλεια μάζας εκφρασμένη απόλυτα, η συνολική επιφάνεια διάβρωσης, η απώλεια μάζας ως προς την επιφάνεια διάβρωσης καθώς και ο χρόνος έκθεσης σε μέρες. Οι τιμές μάζας είναι εκφρασμένες σε [gr] ενώ η απώλεια μάζας ανά μονάδα επιφάνειας είναι εκφρασμένη σε μονάδες  $[gr/cm^2]*10^{-3}$ .

### 8.3 Εμβάπτιση δοκιμίων μικρών διαστάσεων με αστάρι

Αριθμός δοκιμίου	Αρχική μάζα [gr]	Μάζα χωρίς προϊόντα [gr]	Απώλεια μάζας [gr]	Συνολική επιφάνεια διάβρωσης $[cm^2]$	Απώλεια μάζας / Συνολική επιφάνεια διάβρωσης $[gr/cm^2]*10^{-3}$	Ημέρες έκθεσης
2	26.5230	26.4770	0.0460	11.52	3.993	20
4	26.7840	26.7372	0.0468	11.91	3.929	20
7	27.2978	27.2465	0.0513	11.74	4.370	20
8	28.3078	28.2064	0.1014	11.72	8.652	40
9	29.1935	29.0942	0.0993	11.63	8.538	40
10	28.0054	27.9061	0.0993	12.44	7.982	40
11	27.7327	27.5738	0.1589	11.68	13.60	60
12	28.1421	27.9960	0.1461	11.81	12.37	60
14	27.1340	26.9959	0.1381	11.97	11.54	60
15	27.4152	27.2217	0.1935	12.13	15.95	75
16	26.8064	26.6204	0.1860	11.89	15.64	75
17	27.7565	27.5784	0.1781	11.66	15.27	75

Πίνακας 8.2: Μετρήσεις μάζας δοκιμίων μικρών διαστάσεων με αστάρι πειράματος εμβάπτισης

Για την κατανόηση της εξέλιξης του φαινομένου και του ρυθμού της απώλειας μάζας, είναι απαραίτητη η γραφική παράσταση της απώλειας μάζας ως προς το χρόνο.



Διάγραμμα 8.3: Καμπύλη απώλειας μάζας προς χρόνο έκθεσης

Η διεργασία προσεγγίζεται μέσω της εξίσωσης:  $y=ax^b$

Όπου  $a = 0.2064$  και  $b = 1.0023$ . Η προσέγγιση είναι αποδεκτή αφού  $r^2 = 0.9942 < 1$ . Από το διάγραμμα αλλά και από τις τιμές του πίνακα μπορεί να παρατηρηθεί ότι το δοκίμιο 11 παρουσιάζεται να έχει μεγάλη απώλεια μάζας σε σχέση με τα δοκίμια 12 και 14 που αντιστοιχούν στον ίδιο χρόνο έκθεσης δηλαδή στις 60 ημέρες. Η απόκλιση αυτή μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή για τους λόγους που θα αναφερθούν στην ενότητα των συμπερασμάτων. Μία άλλη παρατήρηση είναι ότι η καμπύλη δεν απέχει πολύ από ευθεία και ότι για τους υπόλοιπους χρόνους έκθεσης δεν υπάρχει ιδιαίτερα μεγάλη διασπορά των αποτελεσμάτων.

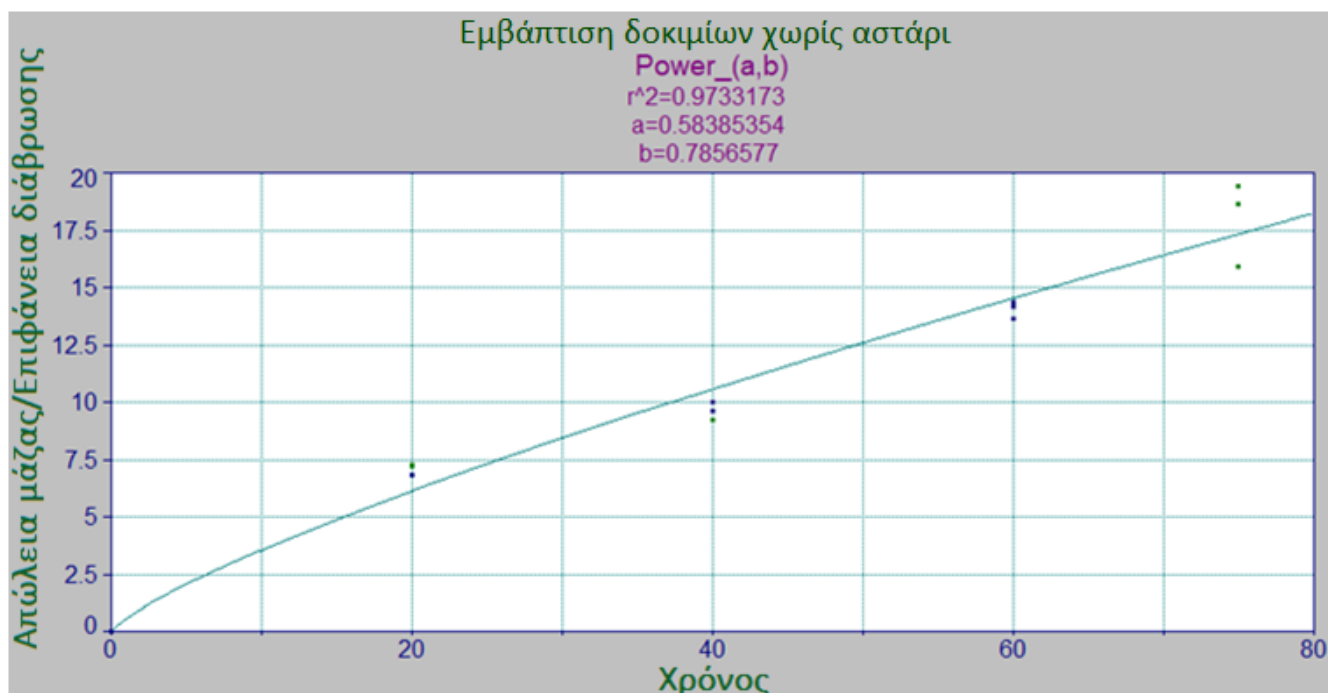
#### 8.4 Εμβάπτιση δοκιμίων μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι

**Σημείωση:** Τα δοκίμια χωρίς αστάρι μονώθηκαν τόσο με ακρυλικό διάλυμα όσο και με κεριό στις πλευρικές τους επιφάνειες, συνεπώς θεωρούμε πως το μοναδικό τμήμα των δοκιμίων που διαβρώθηκε βρίσκεται στις δύο απροστάτευτες από μονωτικό υλικό επιφάνειες. Για το λόγο αυτό, ως συνολική επιφάνεια διάβρωσης ορίζουμε το άθροισμα των απροστάτευτων επιφανειών των δοκιμίων χωρίς αστάρι. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με ηλεκτρονικό παχύμετρο και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω περιεκτικό πίνακα. Η απώλεια μάζας ως προς την επιφάνεια είναι εκφρασμένη σε  $(\text{gr}/\text{cm}^2) \cdot 10^{-3}$

Αριθμός δοκιμίου	Αρχική μάζα [gr]	Μάζα χωρίς προϊόντα [gr]	Απώλεια μάζας [gr]	Συνολική επιφάνεια διάβρωσης [cm <sup>2</sup> ]	Απώλεια μάζας / Συνολική επιφάνεια διάβρωσης [gr/cm <sup>2</sup> ]*10 <sup>-3</sup>	Ημέρες έκθεσης
2'	27.5224	27.4396	0.0828	11.35	7.295	20
4'	26.9254	26.8398	0.0856	11.78	7.267	20
7'	27.2074	27.1283	0.0791	11.6	6.819	20
8'	27.0247	26.9134	0.1113	11.58	9.611	40
9'	27.4407	27.3257	0.1150	11.45	10.04	40
10'	28.9974	28.8837	0.1137	12.28	9.259	40
11'	27.2703	27.1043	0.1660	11.54	14.38	60
12'	27.0207	26.8617	0.1583	11.59	13.66	60
14'	27.4647	27.2972	0.1675	11.83	14.16	60
15'	28.3402	28.1073	0.2329	11.97	19.46	75
16'	27.7470	27.5277	0.2193	11.75	18.66	75
17'	26.9054	26.7226	0.1828	11.49	15.91	75

Πίνακας 8.4: Μετρήσεις μάζας δοκιμών μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι πειράματος εμβάπτισης

Για την κατανόηση της εξέλιξης του φαινομένου και του ρυθμού της απώλειας μάζας, είναι απαραίτητη η γραφική αναπαράσταση της απώλειας μάζας ως προς το χρόνο.



Διάγραμμα 8.5: Καμπύλη απώλειας μάζας προς χρόνο έκθεσης

Η διεργασία προσεγγίζεται μέσω της εξίσωσης:  $y = ax^b$

Όπου  $a = 0.5839$  και  $b = 0.7857$ . Η προσέγγιση είναι αποδεκτή αφού  $r^2 = 0.9733 < 1$ . Από το διάγραμμα αλλά και από τις τιμές του πίνακα μπορεί να παρατηρηθεί ότι το δοκίμιο 17' παρουσιάζεται να έχει μικρή απώλεια μάζας σε σχέση με τα δοκίμια 15' και 16' που αντιστοιχούν στον ίδιο χρόνο έκθεσης δηλαδή στις 75 ημέρες. Η απόκλιση αυτή μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή για τους λόγους που θα αναφερθούν στην ενότητα των συμπερασμάτων. Μία άλλη παρατήρηση είναι ότι η καμπύλη διάβρωσης τείνει να έχει σχετικά σταθερή κλίση μετά τις 20 μέρες διάβρωσης, πράγμα που αποτυπώνεται και από τη γραμμικότητα της καμπύλης στο διάστημα αυτό.

## 8.5 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα εμβάπτισης δοκιμών μικρών διαστάσεων

Στην ενότητα αυτή, παραθέτουμε διάφορα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν έπειτα από την παρατήρηση των ανωτέρω διαγραμμάτων, σχετικά με την έκθεση σε λουτρό εμβάπτισης δοκιμών με αλλά και χωρίς αστάρι. Στη συνέχεια θα διατυπωθούν και ορισμένες παρατηρήσεις που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της πειραματικής άσκησης και πιθανόν να μην είναι εμφανή από τα διαγράμματα που έχουν παρατεθεί.

### Σχετικά με την εμβάπτιση δοκιμών μικρών διαστάσεων με αστάρι:

- i. Από το διάγραμμα απώλειας μάζας – χρόνος έκθεσης συνεπάγεται το συμπέρασμα ότι η απώλεια μάζας των δοκιμών με αστάρι πραγματοποιείται σχεδόν γραμμικά. Αυτό πρακτικά σημαίνει πως οι τιμές των απωλειών μάζας αυξάνονται με αριθμητική πρόοδο διαφοράς  $\sim 0.05$  gr. Το συμπέρασμα αυτό φαίνεται επίσης και από την εικόνα 8.3 όπου η καμπύλη είναι σχεδόν γραμμική καθώς η τιμή του εκθέτη  $b$  είναι σχεδόν ίση με τη μονάδα και συγκεκριμένα είναι  $b = 1.0023$ .
- ii. Παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι ανάμεσα στις 60 και 75 ημέρες διάβρωσης, η διασπορά των τιμών απώλειας μάζας είναι αισθητά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στις χρονικές στιγμές 20 και 40. Στις 60 ημέρες έκθεσης, η διαφορά της χαμηλότερης τιμής απώλειας μάζας σε σχέση με την αντίστοιχη υψηλότερη τιμή και η εύρεση σε ποσοστιαία απόκλιση προκύπτει από την εξής σχέση:
- iii.

$$\sigma = \frac{13.60 - 11.54}{13.60} * 100\% = 15.15 \%$$

Άρα, η μεταβλητότητα των τιμών στην περιοχή αυτή είναι:  $\sigma^2 = 2.295\%$ . Η τιμή αυτή είναι αποδεκτή καθώς δεν ξεπερνά την τιμή του 15% που έχουμε θέσει ως οριακή τιμή αποδοχής των πειραματικών αποτελεσμάτων ( $r^2 > 0.85$ ).

Αντίστοιχα, η διαφορά της χαμηλότερης τιμής απώλειας μάζας σε σχέση με την αντίστοιχη υψηλότερη τιμή για χρόνο έκθεσης 75 ημέρες, υπολογίζεται παρακάτω:

$$\sigma = \frac{15.95 - 15.27}{15.95} * 100\% = 4.26 \%$$

Άρα, η μεταβλητότητα των τιμών στην περιοχή αυτή είναι:  $\sigma^2 = 0.181\%$ . Η τιμή αυτή είναι αποδεκτή καθώς δεν ξεπερνά την τιμή του 15% που έχουμε θέσει ως οριακή τιμή αποδοχής των πειραματικών αποτελεσμάτων ( $r^2 > 0.85$ ). Η διασπορά των τιμών στην περιοχή αυτή για τα δοκίμια με αστάρι μπορεί να οφείλεται σε κάποιον από τους κατωτέρω λόγους.

- iv. Σφάλματα μέτρησης λόγω κατασκευαστικής αστοχίας της μετρητικής διάταξης, ή ακόμα και λόγω λανθασμένης αντιστάθμισης βάρους έπειτα από κάποια μέτρηση.
- v. Πιθανότητα εμφάνισης αυξημένης διάβρωσης λόγω ανεπιθύμητης επαφής μεταξύ των δοκιμίων κατά την τοποθέτησή τους στο λουτρό εμβάπτισης. Όσο πιο κοντά τοποθετημένα είναι τα δοκίμια τα οποία εκθέτονται σε διαβρωτικό περιβάλλον, τόσο ελλοχεύει ο κίνδυνος ανάπτυξης ανεπιθύμητων τάσεων (διαφορά δυναμικού) μεταξύ των ενεργών επιφανειών διάβρωσης μεταξύ τους, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση του ρυθμού διάβρωσης.
- vi. Τέλος, τυχόν οξείδια και προϊόντα διάβρωσης τα οποία επικάθισαν στις επιφάνειες των δοκιμίων και δεν αφαιρέθηκαν στο στάδιο του καθαρισμού τους και της απομάκρυνσης της υγρασίας, πιθανόν να εισήγαγαν σφάλματα μέτρησης, τα οποία δεν εισήλθαν σε όλες τις μετρήσεις παρά μόνο σε συγκεκριμένες, με αποτέλεσμα τη δημιουργία διασποράς των τιμών σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή.
- vii. Ένα γενικό συμπέρασμα που προκύπτει από το διάγραμμα απώλειας μάζας/επιφάνεια διάβρωσης – χρόνος έκθεσης για την εμβάπτιση δοκιμίων με αστάρι είναι ότι σε γενικές γραμμές ο ρυθμός διάβρωσης παραμένει σταθερός και ότι η μεταβλητότητα των τιμών βρίσκεται σε αποδεκτές τιμές. Άλλωστε, είναι λογικό ο ρυθμός διάβρωσης να παραμένει σε σχετικά χαμηλά επίπεδα και λόγω της ειδικής επικάλυψης των δοκιμίων με αστάρι, το οποίο προσφέρει αντιδιαβρωτική προστασία στα δοκίμια.

#### Σχετικά με την εμβάπτιση δοκιμίων μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι:

- i. Από το διάγραμμα απώλειας μάζας/επιφάνεια διάβρωσης – χρόνος έκθεσης εξάγεται το συμπέρασμα ότι η απώλεια μάζας των δοκιμίων χωρίς αστάρι πραγματοποιείται σχετικά ομοιόμορφα όσον αφορά το ρυθμό διάβρωσης και την εξέλιξη της πορείας της διάβρωσης. Αυτό πρακτικά φαίνεται από την εικόνα 8.5 όπου η καμπύλη είναι σχεδόν γραμμική καθώς η τιμή του εκθέτη  $b$  είναι κοντά στη μονάδα και συγκεκριμένα είναι  $b = 0.7857$ .
- ii. Σχετικά με την εξέλιξη του φαινομένου διάβρωσης των δοκιμίων χωρίς αστάρι, μπορούμε να αποφανθούμε ότι ο ρυθμός διάβρωσης επιταχύνεται μεταξύ του χρόνου έκθεσης 40 – 60 ημέρες.
- iii. Από τον πίνακα 8.4, μπορούμε να υπολογίσουμε τον αριθμητικό μέσο των απωλειών μάζας/επιφάνεια διάβρωσης για κάθε χρονική περίοδο διάβρωσης. Έτσι, μετά από 20 μέρες διάβρωσης, η απώλεια μάζας/επιφάνεια διάβρωσης ανέρχεται στα  $7.127 \text{ [gr/cm}^2\text{]} \cdot 10^{-3}$ , στις 40 μέρες διάβρωσης στα  $9.64 \text{ [gr/cm}^2\text{]} \cdot 10^{-3}$ , στις 60 μέρες στα  $14.07 \text{ [gr/cm}^2\text{]} \cdot 10^{-3}$  ενώ στις 75 μέρες στα  $18.01 \text{ [gr/cm}^2\text{]} \cdot 10^{-3}$ . Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι ο μέγιστος ρυθμός διάβρωσης εμφανίζεται στο χρονικό διάστημα μεταξύ 40 – 60 ημέρες διάβρωσης και υπολογίζεται:

$$(\text{Ρυθμός διάβρωσης})_{\max} = \frac{14.07 - 9.64}{60 - 40} = 0.2215 \text{ [gr/cm}^2\text{]} \cdot 10^{-3} / \text{ημέρα}$$

- iv. Μετά από τις 75 μέρες διάβρωσης, παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμίων χωρίς αστάρι στο λουτρό εμβάπτισης συνεχίζει να αυξάνεται γραμμικά, γεγονός που αποδεικνύει την ομαλότητα με την οποία εξελίσσεται το φαινόμενο της διάβρωσης.
- v. Παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι για χρόνο έκθεσης 75 ημέρες, η διασπορά των τιμών απώλειας μάζας είναι αισθητά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στις χρονικές στιγμές 20, 40 και 60. Στις 75 ημέρες έκθεσης, η διαφορά της χαμηλότερης τιμής απώλειας μάζας σε σχέση με την αντίστοιχη υψηλότερη τιμή και η εύρεση σε ποσοστιαία απόκλιση προκύπτει από την εξής σχέση:
- vi.

$$\sigma = \frac{19.46 - 15.91}{19.46} * 100\% = 18.24 \%$$

Άρα, η μεταβλητότητα των τιμών στην περιοχή αυτή είναι:  $\sigma^2 = 3.33\% < 15\%$ . Η τιμή αυτή είναι αποδεκτή καθώς δεν ξεπερνά την τιμή του 15% που έχουμε θέσει ως οριακή τιμή αποδοχής των πειραματικών αποτελεσμάτων ( $r^2 > 0.85$ ).

Η διασπορά των τιμών στην περιοχή αυτή για τα δοκίμια χωρίς αστάρι μπορεί να οφείλεται σε κάποιον από τους κατωτέρω λόγους.

- vii. Κατασκευαστικά σφάλματα μέτρησης της μετρητικής διάταξης, ή ακόμα και λόγω λανθασμένης αντιστάθμισης βάρους έπειτα από κάποια μέτρηση.
- viii. Πιθανότητα εμφάνισης αυξημένης διάβρωσης λόγω ανεπιθύμητης επαφής μεταξύ των δοκιμίων μικρών διαστάσεων κατά την τοποθέτησή τους στο λουτρό εμβάπτισης. Όσο πιο κοντά τοποθετημένα είναι τα δοκίμια τα οποία εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον, τόσο ελλοχεύει ο κίνδυνος ανάπτυξης ανεπιθύμητων τάσεων (διαφορά δυναμικού) μεταξύ των ενεργών επιφανειών διάβρωσης μεταξύ τους, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Επίσης, υπάρχει και μια μικρή πιθανότητα επαφής των δοκιμίων με τα τοιχώματα του ορθγωνίου δοχείου που περιείχε το διάλυμα NaCl. Όσα αναφέρθηκαν ισχύουν υπό την προϋπόθεση ότι τα δοκίμια 15' και 16' εμφανίζουν αυξημένα ποσοστά διάβρωσης σε σχέση με το υπ' αριθμόν 17'.
- ix. Σφάλματα μέτρησης λόγω επικάλυψης τριμμάτων κεριού στην επιφάνεια των δοκιμίων και κάλυψής τους με προϊόντα οξείδωσης, είναι πολύ πιθανό να οδήγησαν σε αυξημένες τιμές μάζας κατά τη ζύγιση των δοκιμίων χωρίς αστάρι. Η πιθανότητα να συνέβη κάτι τέτοιο είναι πολύ μικρή δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκε χημικός καθαρισμός, ωστόσο δεν μπορούμε να την αποκλείσουμε τελείως.
- x. Τέλος, τυχόν οξείδια και προϊόντα διάβρωσης τα οποία εισήλθαν στο πορώδες τμήμα των απροστάτευτων επιφανειών των δοκιμίων χωρίς αστάρι και δεν απομακρύνθηκαν κατά το στάδιο του στεγνώματος, μπορεί να οδήγησαν σε μειωμένες τιμές απώλειας μάζας κατά τη ζύγιση.



## 8.6 Διάταξη πειράματος εμβάπτισης δοκιμίων

Όπως και στο πείραμα της εμβάπτισης των δοκιμίων μικρών διαστάσεων, έτσι και στο πείραμα της εμβάπτισης των χαλύβδινων δοκιμίων, χρησιμοποιήθηκε αυτοσχέδια διάταξη με σκοπό τη συνεχή έκθεση των δοκιμίων σε διαβρωτικό περιβάλλον. Πιο συγκεκριμένα, για την εκτέλεση του πειράματος, χρησιμοποιήθηκαν δύο κυλινδρικά δοχεία, τα οποία περιείχαν το διάλυμα NaCl και εσωτερικά στην περιφέρεια των δοχείων αυτών τοποθετήθηκαν τα χαλύβδινα δοκίμια. Ιδιαίτερη προσοχή έπρεπε να επιδείξουμε στις αποστάσεις μεταξύ των δοκιμίων αυτών. Πιο συγκεκριμένα, τα δοκίμια εντός των κυλινδρικών δοχείων δεν έπρεπε σε καμία περίπτωση να έρχονται σε επαφή μεταξύ τους, γεγονός που θα οδηγούσε σε εσφαλμένα πειραματικά δεδομένα, λόγω του αυξημένου ρυθμού διάβρωσης που θα πραγματοποιούνταν. Στην περίπτωση αυτή, υπάρχει διπλός κίνδυνος. Καταρχάς, τα προϊόντα διάβρωσης ενός δοκιμίου μπορεί να επικαθίσουν στην επιφάνεια κάποιου άλλου δοκιμίου μεταφερόμενα από το διάλυμα NaCl και δεύτερον, λόγω της συνεχούς διάβρωσης των δοκιμίων θα αναπτυσσόταν διαφορά δυναμικού μεταξύ τους, γεγονός που θα επιτάχυνε το ρυθμό απώλειας μάζας χωρίς να το επιθυμούμε.

Στο σημείο αυτό πρέπει να σημειωθεί ότι τα δοκίμια έπρεπε αναγκαστικά να έρχονται σε επαφή σε κάποια σημεία με τα τοιχώματα των κυλινδρικών δοχείων ώστε να μπορέσουμε να τα σταθεροποιήσουμε εντός του λουτρού εμβάπτισης. Παρ'όλα αυτά, η επίδραση της διεπαφής των δοχείων με τα δοκίμια κρίνεται αμελητέα όσον αφορά τη μεταβολή του ρυθμού διάβρωσής τους, καθώς η επαφή γινόταν σε δύο μικρές γραμμικές περιοχές των δοκιμίων, μία στο άνω τμήμα των δοκιμίων και μία στο κάτω τμήμα, κατά την επαφή με τον πυθμένα του κυλινδρικού δοχείου. Σε κάθε περίπτωση, τα δοκίμια αυτά προορίζονταν για μηχανικές δοκιμές, συνεπώς δεν μας ενδιέφερε ο ρυθμός διάβρωσης όλων των περιοχών των δοκιμίων, παρά μόνο στην περιοχή του λαιμού, η οποία και μονώθηκε καταλλήλως τόσο με ακρυλικό διάλυμα όσο και με κερί.

Για την εξασφάλιση σταθερών συνθηκών θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια του πειράματος έγινε χρήση συσκευής που θέρμαινε απιονισμένο νερό σε θερμοκρασία 30°C. Αυτό κυκλοφορεί μέσω σωληνώσεων και θερμαίνει το νερό που περιέχεται στη λεκάνη όπου τοποθετήθηκαν τα δοχεία με το διάλυμα NaCl και τα δοκίμια. Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως τα δοκίμια χωρίς αστάρι, καθώς και τα δοκίμια με αστάρι έπρεπε να καταλαμβάνουν ξεχωριστά κυλινδρικά δοχεία για την έκθεσή τους στο διάλυμα NaCl ώστε να μην υπάρχει περαιτέρω διάβρωση κυρίως των δοκιμίων χωρίς αστάρι από τα διάφορα διαβρωτικά στοιχεία που περιέχει το αστάρι (π.χ ψευδάργυρος). Στη συνέχεια παρατίθεται μια εικόνα ώστε να γίνει πλήρως κατανοητή η συνολική διάταξη του λουτρού εμβάπτισης κατά την έκθεση των δοκιμίων με και χωρίς αστάρι.



Εικόνα 8.6:  
Πειραματική διάταξη  
εμβάπτισης δοκιμίων.  
Δοκίμια με αστάρι  
δεξιά και χωρίς αστάρι  
αριστερά.

## 8.7 Εκτέλεση πειράματος εμβάπτισης δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 8.2 σχετικά με την εκτέλεση του πειράματος εμβάπτισης των δοκιμίων μικρών διαστάσεων με και χωρίς αστάρι, η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και στην περίπτωση της εμβάπτισης των δοκιμίων στο λουτρό NaCl.

Να σημειωθεί πως τα δοκίμια με αστάρι εισήλθαν στο λουτρό εμβάπτισης χωρίς κάποια περαιτέρω μόνωση, ενώ τα δοκίμια χωρίς αστάρι μονώθηκαν στις περιφερειακές τους επιφάνειες τόσο με ακρυλικό διάλυμα, όσο και με κερί. Τα χρονικά διαστήματα έκθεσης των χαλύβδινων δοκιμίων στο διάλυμα NaCl ήταν 3:

1. 0 – 15 ημέρες έκθεσης
2. 15 – 35 ημέρες έκθεσης
3. 35 – 60 ημέρες έκθεσης

Η θερμοκρασία του διαλύματος χλωριούχου νατρίου ελεγχόταν τακτικά και οι απώλειες νερού όσμωσης από εξάτμιση αναπληρώνονταν όποτε ήταν απαραίτητο. Να σημειωθεί πως οι απώλειες του διαλύματος NaCl ήταν ελάχιστες λόγω της τοποθέτησης κατάλληλης ζελατίνης στο άνω μέρος των κυλινδρικών δοχείων, διατηρώντας έτσι παράλληλα τις συνθήκες διάβρωσης σταθερές όπως επισημάνθηκε και στην προηγούμενη ενότητα. Η σχετική διάταξη παρουσιάστηκε στην εικόνα 8.6, όπου είναι εμφανής και η τοποθέτηση ζελατίνης ώστε να διατηρείται κατά κύριο λόγο σταθερή η σύσταση του διαλύματος NaCl.

Μετά το πέρας κάθε απαιτούμενου χρονικού διαστήματος έκθεσης στο διάλυμα χλωριούχου νατρίου, τα δοκίμια απομακρύνονταν από το δοχείο, καθαρίζονταν με νερό όσμωσης και σπόγγο ώστε να απομακρυνθούν τα επιφανειακά οξείδια και προϊόντα διάβρωσης τα οποία επικάθονταν στην επιφάνειά τους. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετούνταν σε κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο στεγνώματος για κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα, με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας και διαφόρων εγκλεισμάτων στην πορώδη επιφάνειά τους. Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των δοκιμίων δεν εφαρμόστηκε χημικός καθαρισμός σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος, αφού βασικός σκοπός της συγκεκριμένης πειραματικής διαδικασίας ήταν η μελέτη της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων (όριο διαρροής  $\sigma_y$ , μέγιστη εφελκυστική αντοχή  $\sigma_{UTS}$  και τάση θραύσης  $\sigma_\theta$ ) λόγω της έκθεσης των δοκιμίων σε διαβρωτικό περιβάλλον με αποτέλεσμα την απώλεια μάζας και τη μείωση της αρχικής τους

διατομής σε κάθε περίπτωση πριν την έναρξη του πειράματος εφελκυσμού. Η μόνωση σε κάθε περίπτωση έπρεπε να αφαιρεθεί πριν τη δοκιμή εφελκυσμού, ώστε να επιτευχθεί σταθερή συγκράτηση από την αρπάγη. Σε περίπτωση μη αφαίρεσης της περιφερειακής μόνωσης, εγκυμονούσε ο κίνδυνος ολίσθησης του δοκιμίου στην αρπάγη, γεγονός που θα εισήγαγε μεγάλα σφάλματα στη μελέτη των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Τα δοκίμια, μετά το στέγνωμα, συλλέγονταν και αριθμούνταν κατάλληλα ώστε στη συνέχεια να μεταφερθούν στο μηχανουργείο της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών με σκοπό τη θραύση με επιβολή εφελκυστικού φορτίου. Στη συνέχεια για λόγους κατανόησης παρατίθενται εικόνες από τρία διαφορετικά στάδια μηχανικής καταπόνησης των δοκιμίων κατά την έναρξη της δοκιμής εφελκυσμού. Αυτά είναι:

1. Αρχικά απαραμόρφωτο δοκίμιο
2. Παραμορφωμένο δοκίμιο εντός της πλαστικής περιοχής
3. Αστοχία



Εικόνα 8.7: Αρχικά απαραμόρφωτο δοκίμιο



Εικόνα 8.8: Δοκίμιο εντός πλαστικής περιοχής



Εικόνα 8.9: Αστοχία δοκιμίου

## 8.8 Μελέτη μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων με αστάρι λόγω εμβάπτισης σε λουτρό NaCl

Στη συνέχεια παρατίθεται ο συνοπτικός πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων 8.10 όπου παρουσιάζονται ο αριθμός του δοκιμίου, η μέθοδος διάβρωσης, ο χρόνος έκθεσης καθώς και οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων που αναφέρονται, με σκοπό την ενδελεχή εξέταση της μεταβολής τους. Στην προκειμένη ενότητα, παραθέτουμε αναλυτικά το μηχανισμό διάβρωσης μέσω εμβάπτισης σε λουτρό NaCl για δοκίμια με αστάρι.

Είναι κατανοητό, πως για μια συγκεκριμένη μέθοδο διάβρωσης (π.χ εμβάπτιση σε λουτρό NaCl) τα δοκίμια θα παρουσιάζουν μεταβολές στις μηχανικές τους ιδιότητες για διαφορετικούς χρόνους έκθεσης. Στο σημείο αυτό, αυτό που θέλουμε να παρατηρήσουμε είναι ο μηχανισμός με τον οποίο μεταβάλλονται οι μηχανικές ιδιότητες των χαλύβδινων δοκιμίων ώστε στο τέλος να εξαγάγουμε τα αντίστοιχα συμπεράσματα.

Σε γενικές γραμμές, πριν την παράθεση των συνοπτικών πινάκων μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων, είναι προφανές πως όσο αυξάνεται ο χρόνος έκθεσης των δοκιμίων σε διαβρωτικές συνθήκες, τόσο η αρχική τους διατομή πριν τη μηχανική καταπόνηση θα μειώνεται, λόγω της αναμενόμενης απώλειας μάζας. Συνεπώς, θα μπορούσαμε εσφαλμένα να ισχυριστούμε, πως τόσο το όριο διαρροής, η μέγιστη εφελκυστική τάση καθώς και η τάση θραύσης των δοκιμίων θα αυξάνονται, καθώς η σχέση που συνδέει τα μεγέθη αυτά είναι αντιστρόφως ανάλογη της διατομής τους. Ωστόσο, όπως θα εξετάσουμε και σε επόμενο κεφάλαιο μέσω της μελέτης με χρήση S.E.M σε επίπεδο μικροδομής, αύξηση του χρόνου διάβρωσης έχει ως αποτέλεσμα την ανάπτυξη διατμητικών τάσεων οι οποίες «ταξιδεύουν» στο σώμα των δοκιμίων, δημιουργούν μικρορωγμές, οι οποίες στη συνέχεια μειώνουν σημαντικά τη μηχανική αντοχή των δοκιμίων και οδηγούν σταδιακά είτε σε όλκιμη είτε σε ψαθυρή είτε σε ενδιάμεση θραύση. Συνεπώς, ως κρίσιμος παράγοντας για τη μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων ορίζεται ο δεύτερος και υπερκαλύπτει τον πρώτο, ο οποίος σχετίζεται μονοσήμαντα με τη μεταβολή της διατομής των δοκιμίων.

Ωστόσο, σε πειραματικό επίπεδο, ο ανωτέρω κανόνας είναι πολύ πιθανό να μην ισχύει απόλυτα, αλλά στις περισσότερες των περιπτώσεων, δεδομένων των πειραματικών σφαλμάτων και του παράγοντα τυχαιότητας που υπεισέρχεται στις πειραματικές μετρήσεις.

Να σημειωθεί πως συνολικά θα παρατεθούν 4 συνοπτικοί πίνακες μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων:

- i. Με αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης NaCl
- ii. Χωρίς αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης NaCl
- iii. Με αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης
- iv. Χωρίς αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης

Για κάθε μία κατηγορία από τις ανωτέρω, εκτός από το συνοπτικό πίνακα μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων, θα ακολουθήσει παρουσίαση καμπυλών του επιβαλλόμενου φορτίου συναρτήσει της επιμήκυνσης των δοκιμίων καθώς και καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης, οι οποίες διαμορφώθηκαν με επεξεργασία των πρώτων σε λογιστικό φύλλο excel. Στη συνέχεια, με κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και χρήση του λογισμικού TableCurve καθώς και του excel, θα παρατεθούν οι προκύπτουσες καμπύλες μεταβολής **των μέσων τιμών ορίων διαρροής  $\sigma_y$ , των μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων  $\sigma_{uts}$**

**καθώς και των μέσων τάσεων θραύσεως των δοκιμών συναρτήσει του χρόνου έκθεσης.** Ειδικά για τη μελέτη της μέσης τάσης θραύσεως των δοκιμών, θα παρατεθούν κατάλληλα ραβδογράμματα μέσω του excel ώστε να γίνει σαφής η μεταβολή των μέσων τιμών των τάσεων θραύσεως συναρτήσει του χρόνου έκθεσης των δοκιμών. Όσον αφορά τη μελέτη της μεταβολής του μέτρου ελαστικότητας, πρέπει να επισημανθεί πως δεν κατέστη δυνατή η πειραματική μελέτη της μεταβολής του, διότι κατά την εκτέλεση της πειραματικής διαδικασίας θραύσεως των δοκιμών δεν ήταν δυνατή η τοποθέτηση αισθητήριου οργάνου μέτρησης της επιμήκυνσης των δοκιμών πάνω σε αυτά. Συνεπώς, τα πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με το μέτρο ελαστικότητας θα παρουσίαζαν μεγάλα σφάλματα μέτρησης λόγω του ότι υπεισέρχεται και το μέτρο ελαστικότητας των αρπαγών συγκράτησης των δοκιμών σε αυτά, κατά την εκτέλεση του πειράματος εφελκυσμού.

Προφανώς, τα πειραματικά αποτελέσματα θα σχολιαστούν και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα μας δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για τη λειτουργία των μηχανισμών διάβρωσης και την επίδρασή τους στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών χάλυβα.

**Σημείωση:** Για τον υπολογισμό των τάσεων θραύσεως των δοκιμών, αρχικά υπολογίστηκαν οι διατομές των λαιμών των δοκιμών στην περιοχή της θραύσεως. Οι διατομές αυτές παρατίθενται στο Παράρτημα της παρούσης διπλωματικής εργασίας. Από τα αντίστοιχα διαγράμματα φορτίου – επιμήκυνσης, εντοπίσαμε την τιμή εκείνη του εφελκυστικού φορτίου όπου πραγματοποιείται η θραύση, άρα τα δοκίμια δεν παραμορφώνονται περαιτέρω μετά από αυτή την τιμή του φορτίου. Στη συνέχεια, διαιρέσαμε αυτή την τιμή του φορτίου θραύσεως με την αντίστοιχη διατομή του εξεταζόμενου δοκιμίου και προσδιορίστηκε εν τέλει η τάση θραύσεως των δοκιμών.

Για το λόγο αυτό, η τιμή της τάσης θραύσεως δεν μπορεί να υπολογιστεί διαγραμματικά από τα αντίστοιχα διαγράμματα τάσης – παραμόρφωσης, αφού τα διαγράμματα αυτά προσεγγίστηκαν για μια αρχικά σταθερή διατομή των δοκιμών, η οποία όμως προκύπτει μετά το πέρας του χρόνου έκθεσης των δοκιμών σε διαβρωτικές συνθήκες. Τόσο οι διατομές των δοκιμών στην περιοχή του λαιμού μετά την έκθεση σε συνθήκες διάβρωσης και πριν τις μηχανικές δοκιμές καθώς και οι αντίστοιχες διατομές στην περιοχή θραύσεως των δοκιμών, παρουσιάζονται στο Παράρτημα της παρούσης διπλωματικής εργασίας.

ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΑΣΤΑΡΙ								
Αριθμός δοκιμίου	Μέθοδος διάβρωσης	Χρόνος έκθεσης [Ημέρες]	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	Τάση θραύσης $\sigma_\theta$ [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]
2	Χωρίς διάβρωση	0	386.41	25.30	560.76	1050.72	48.76	119.63
3	Χωρίς διάβρωση	0	403.39	25.37	570.18	1039.84	51.95	114.47
4	Χωρίς διάβρωση	0	409.63	25.12	578.43	1028.36	50.33	108.87
12	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	15	402.19	24.93	572.61	978.45	50.18	112.37
19	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	15	398.24	25.29	571.58	961.24	52.22	119.03
22	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	15	392.22	25.47	563.02	936.90	51.45	118.76
11	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	35	392.85	25.23	563.92	942.40	50.94	117.07
20	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	35	396.58	24.84	567.10	966.92	50.82	111.42
24	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	35	394.08	24.43	564.76	900.64	51.72	113.48
23	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	60	390.26	25.51	566.64	912.87	51.01	118.15
9	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	60	391.00	25.25	566.08	930.26	50.37	112.70
10	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	60	392.03	25.12	561.33	950.89	51.74	112.40

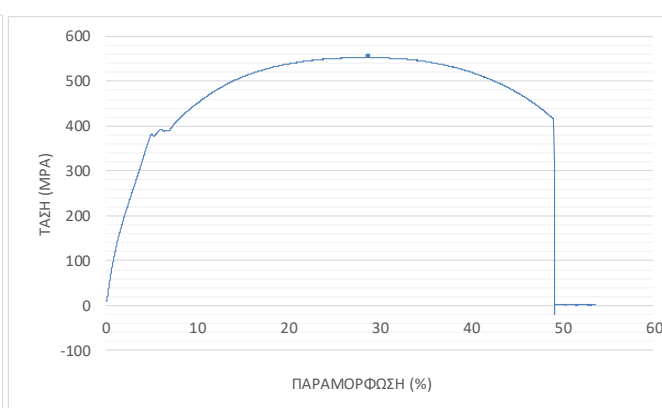
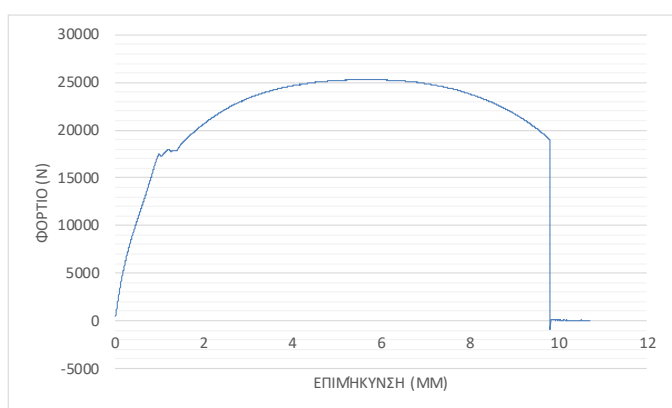
Πίνακας 8.10: Συνοπτικός πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων για δοκίμια με αστάρι διαβρωμένα σε λουτρό εμβάπτισης NaCl.

Για λόγους πληρότητας, σε κάθε συνοπτικό πίνακα μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων, θα παραθέτουμε και τα δοκίμια 2,3,4 τα οποία είναι εντελώς αδιάβρωτα και δεν έχουν ψηγηματοβοληθεί (blank δοκίμια).

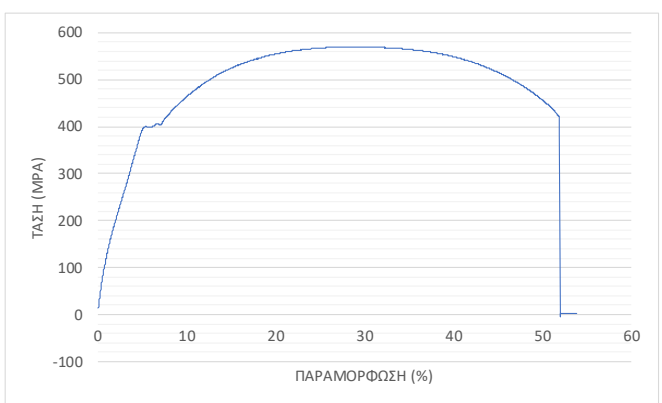
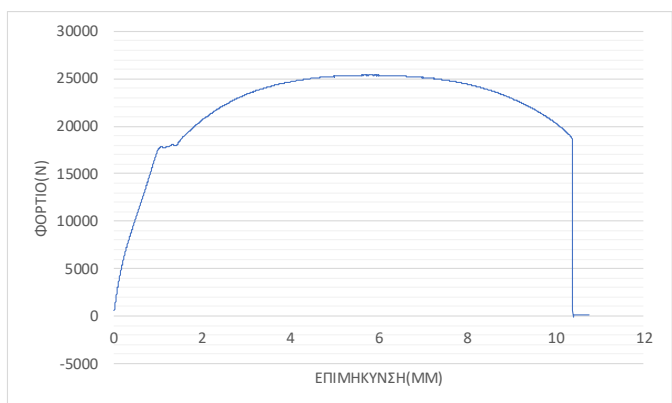
Στη συνέχεια, παραθέτουμε τις καμπύλες μεταβολής της επιβαλλόμενης δύναμης συναρτήσει της επιμήκυνσης των δοκιμίων, καθώς και τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης, βάσει των οποίων προέκυψαν οι 3 βασικές μηχανικές ιδιότητες που αναφέρθηκαν ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_{UTS}$ ,  $\sigma_\theta$ ) καθώς και η % παραμόρφωση των δοκιμίων μέχρι την αστοχία αλλά και η ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση (J).

Τα δοκίμια στα οποία θα αναφέρονται οι παρακάτω καμπύλες είναι αυτά που παρουσιάστηκαν στο συνοπτικό πίνακα 8.10 , εκείνα δηλαδή τα οποία διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης NaCl και δεν έχουν ψηγηματοβοληθεί (δοκίμια με αστάρι).

Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
2	386.41	25.30	560.76	48.76	119.63	1050.72

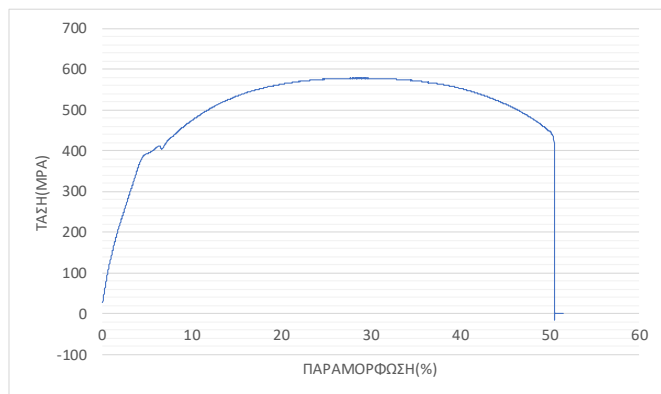
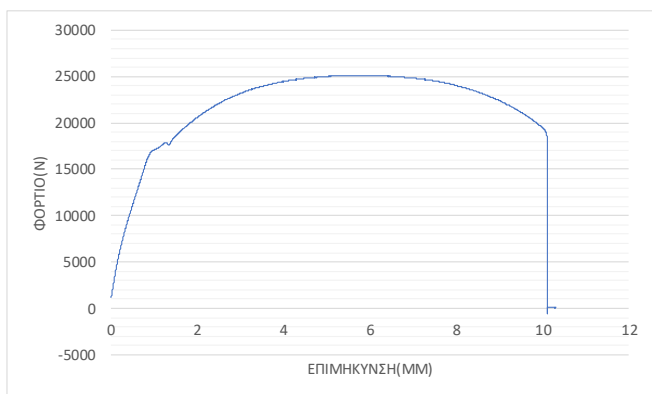


Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
3	403.39	25.37	570.18	51.95	114.47	1039.84

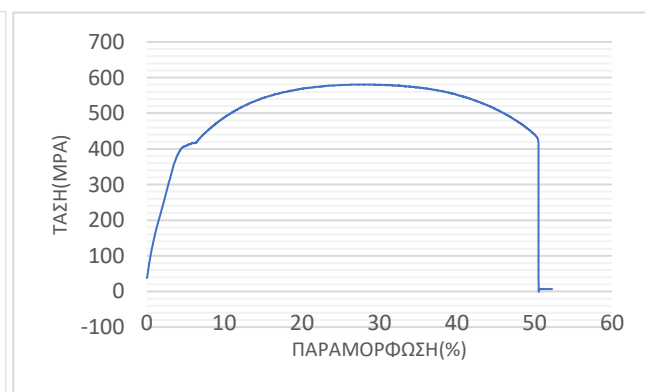
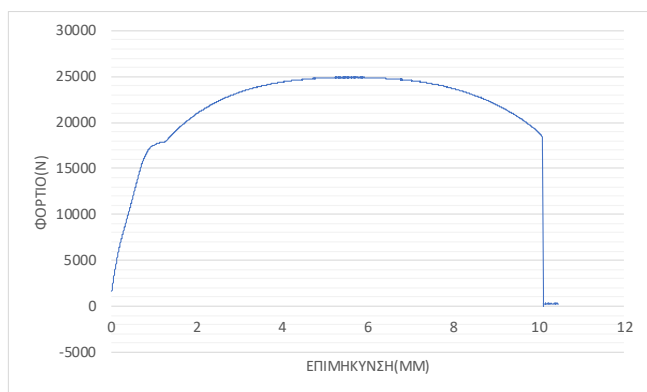




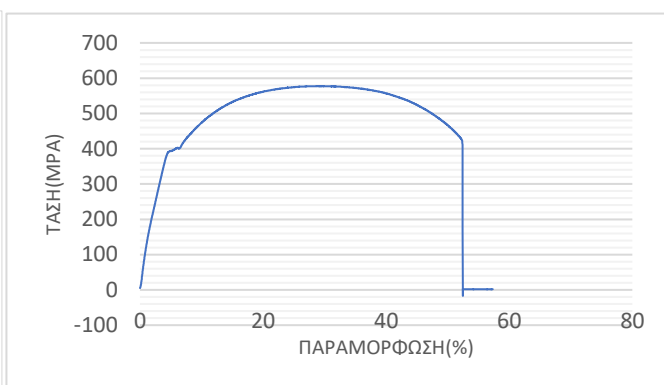
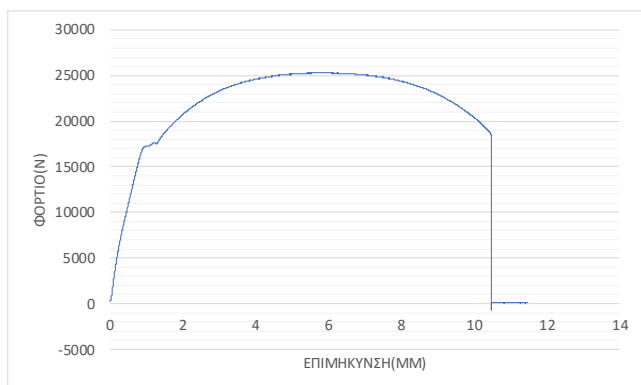
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
4	409.63	25.12	578.43	50.33	108.87	1028.36



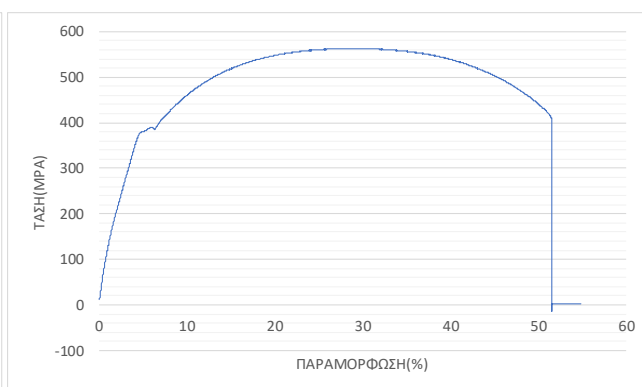
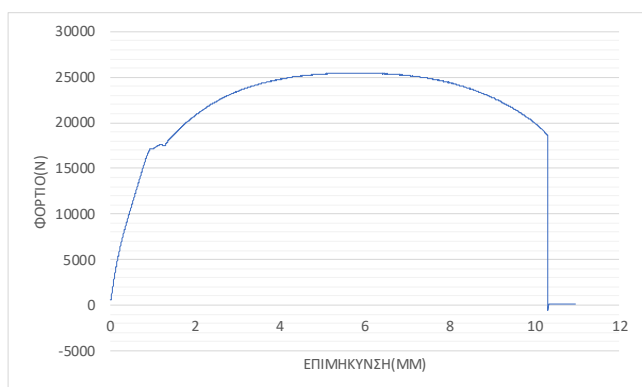
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
12	402.19	24.93	572.61	50.18	112.37	978.45



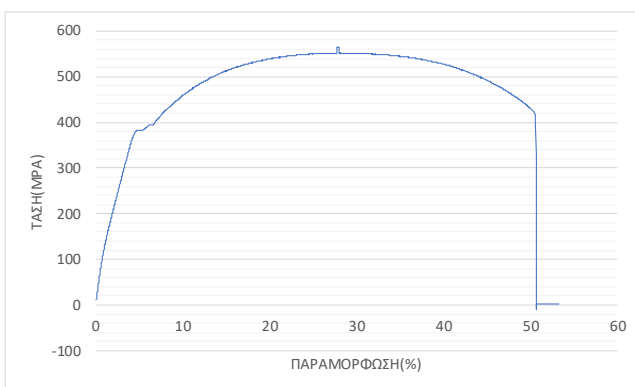
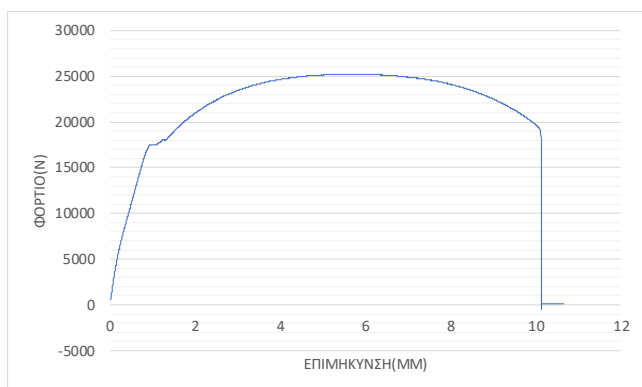
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
19	400.25	25.29	571.58	52.22	119.03	961.24



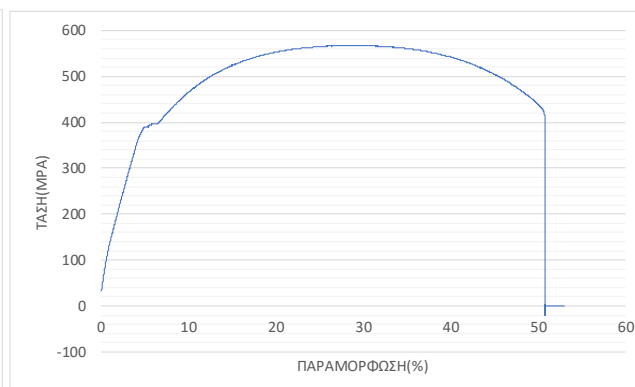
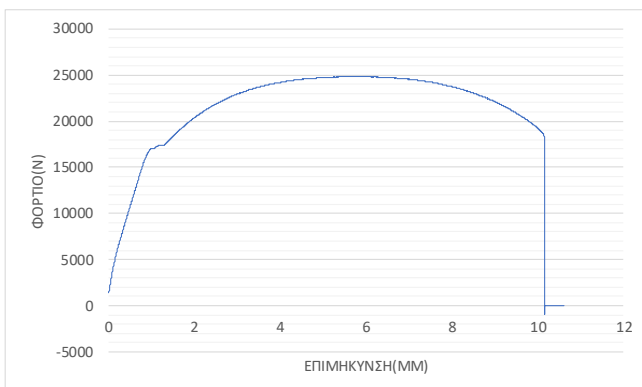
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
22	392.22	25.47	563.02	51.45	118.76	936.90



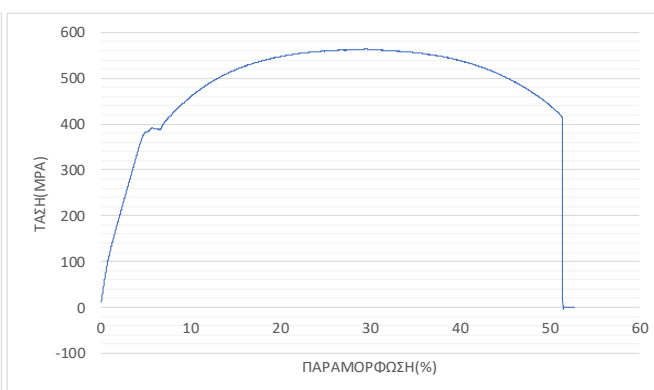
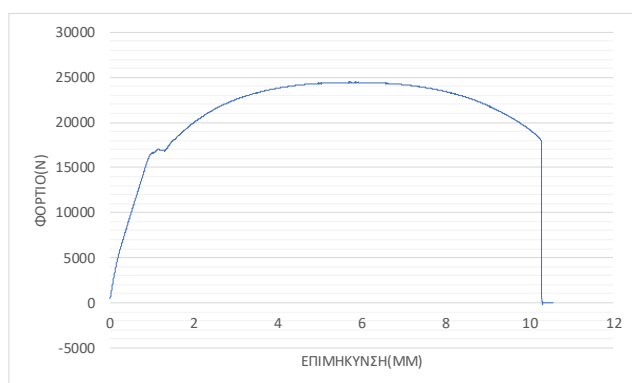
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
11	392.85	25.23	563.92	50.94	117.07	942.40



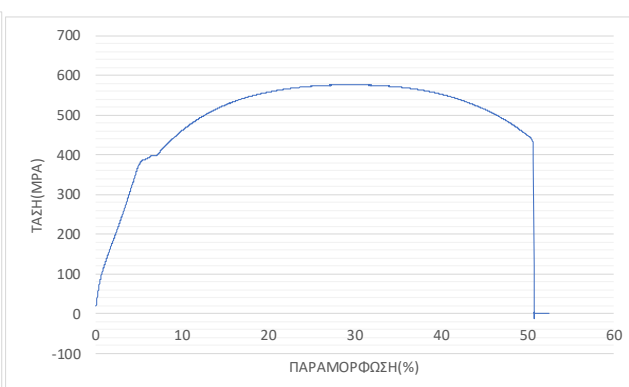
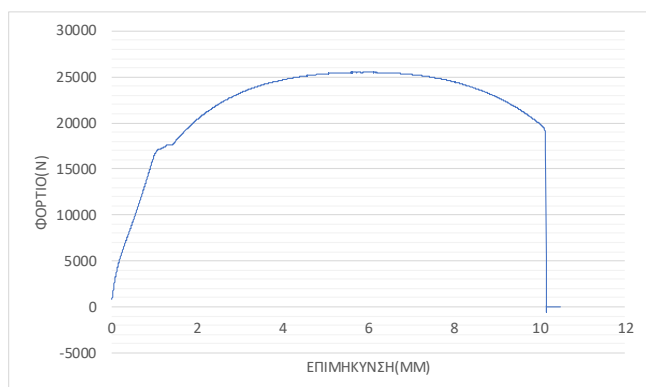
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
20	396.58	24.84	567.10	50.82	111.42	966.92



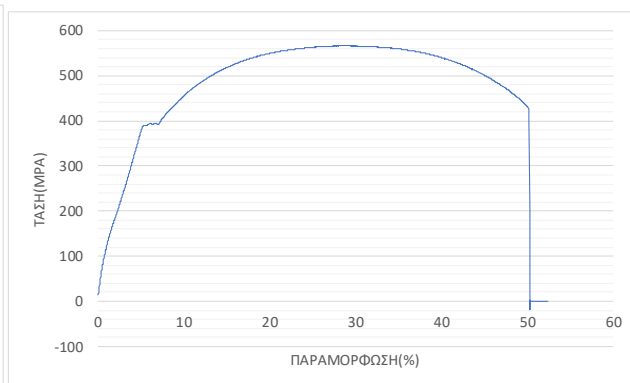
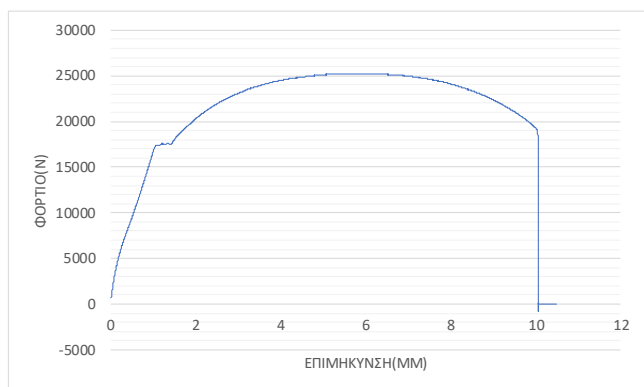
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
24	394.08	24.43	564.76	51.72	113.48	900.64



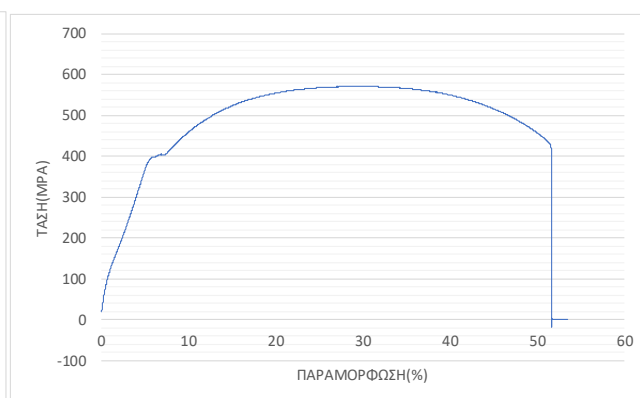
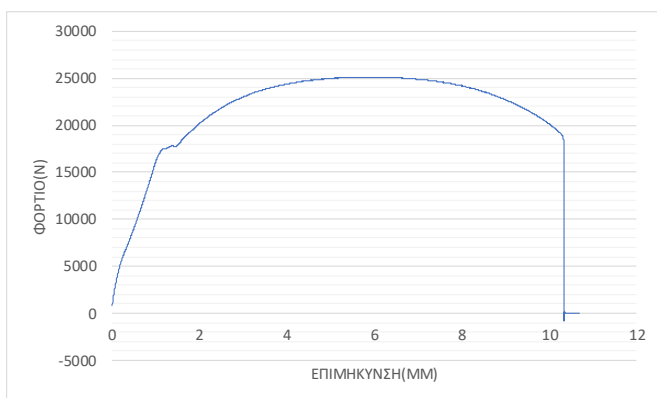
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
23	390.26	25.51	566.64	51.01	118.15	912.87



Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
9	384.00	25.25	566.08	50.37	112.70	930.26



Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
10	392.03	25.12	561.33	51.74	112.40	950.89



## 8.9 Αναλυτική παρουσίαση μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων με αστάρι λόγω εμβάπτισης σε λουτρό NaCl με χρήση λογισμικού TableCurve - Excel

Όπως έχει αναφερθεί, στην παρούσα ενότητα καθίσταται δυνατή η παρουσίαση της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων (όριο διαρροής  $\sigma_y$ , μέγιστη εφελκυστική τάση  $\sigma_{UTS}$  και τάση θραύσης  $\sigma_\theta$ ) τόσο με τη χρήση του λογισμικού TableCurve κατ'αντίστοιχο τρόπο που παρουσιάστηκαν τα διαγράμματα απώλειας μάζας προς την επιφάνεια διάβρωσης σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης, όσο και με το λογιστικό φύλλο του Excel.

Προκειμένου να οδηγηθούμε σε ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με την επίδραση των συνθηκών διάβρωσης μέσω εμβάπτισης των δοκιμίων με αστάρι στο λουτρό NaCl, θα πρέπει να κατασκευάσουμε κατάλληλα διαγράμματα όπου θα παρουσιάζεται η μεταβολή των μέσων μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης. Για το λόγο αυτό, κρίνεται σκόπιμος ο διαχωρισμός της μελέτης μας για κάθε μια μηχανική ιδιότητα που εξετάζεται σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης.

Επομένως, γίνεται εύκολα κατανοητό πως για κάθε μία κατηγορία δοκιμίων που μελετάται σε κάθε μία διαδικασία διάβρωσης, θα πρέπει να παρουσιάσουμε 3 ξεχωριστά διαγράμματα:

1. Μεταβολής των μέσων ορίων διαρροής ( $\sigma_y$ ) σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης
2. Μεταβολής των μέσων μεγίστων εφελκυστικής αντοχής ( $\sigma_{UTS}$ ) σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης.
3. Μεταβολής των μέσων τάσεων θραύσης ( $\sigma_\theta$ ) σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης

Όπως είδαμε και σε προηγούμενη ενότητα, έχουμε συνολικά τις ακόλουθες 4 κατηγορίες που πρέπει να εξετάσουμε:

- i. Δοκίμια με αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης NaCl
- ii. Δοκίμια χωρίς αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης NaCl
- iii. Δοκίμια με αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης
- iv. Δοκίμια χωρίς αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης

Από όλα τα παραπάνω, συμπεραίνουμε ότι θα πρέπει να παραθέσουμε συνολικά  $4 \times 3 = 12$  διαγράμματα μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων για να συμπεριλάβουμε όλων των ειδών τα δοκίμια καθώς και όλες τις διαδικασίες διάβρωσης.

**Σημείωση:** Γίνεται εύκολα κατανοητό, πως όσο μεγαλύτερο είναι το χρονικό διάστημα έκθεσης των δοκιμίων σε διαβρωτικές συνθήκες τόσο οι μηχανικές τους ιδιότητες "υποβαθμίζονται". Αυτό σημαίνει πως τόσο το όριο διαρροής, όσο η μέγιστη εφελκυστική αντοχή και η τάση θραύσης των δοκιμίων θα πρέπει να μειώνονται από τα αρχικώς αδιάβρωτα στα τελικώς διαβρωμένα δοκίμια με ρυθμό που καθορίζεται από το χρόνο έκθεσης.

Στον πίνακα 8.10 παρουσιάζονται οι μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων με αστάρι, τα οποία διαβρώνονται σε λουτρό NaCl. Προκειμένου να βγάλουμε συμπεράσματα σχετικά με την μεταβολή των μηχανικών ιδιοτήτων, θα ομαδοποιήσουμε τα δοκίμια σε τριάδες, ανάλογα με το χρόνο έκθεσής τους. Έτσι, π.χ για τα δοκίμια 2,3,4 τα οποία είναι τα blank δοκίμια, θα υπολογίσουμε μια μέση τιμή τόσο του ορίου διαρροής, όσο της μέγιστης εφελκυστικής τάσης



και της τάσης θραύσης και θα υπολογίσουμε τις καμπύλες μεταβολής αυτών των μέσων μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με το χρόνο. Η ίδια διαδικασία θα ακολουθηθεί για όλα τα δοκίμια και θα προκύψουν τα διαγράμματα σύγκρισης των μηχανικών ιδιοτήτων σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης.

Συνεπώς, από το συνοπτικό πίνακα 8.10 προκύπτει ο ακόλουθος πίνακας με χρήση μέσων τιμών μηχανικών ιδιοτήτων:

<b>ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΑΣΤΑΡΙ</b>					
Αριθμός δοκιμίων	Μέθοδος διάβρωσης	Χρόνος έκθεσης [Ημέρες]	Μέση τιμή ορίου διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέση τιμή μέγιστης εφελκυστικής τάσης ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	Μέση τάση θραύσης $\sigma_\theta$ [MPa]
2,3,4	Χωρίς διάβρωση	0	<b>399.81</b>	<b>569.79</b>	<b>1039.64</b>
12,19,22	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	15	<b>397.55</b>	<b>569.09</b>	<b>958.86</b>
11,20,24	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	35	<b>394.50</b>	<b>565.26</b>	<b>936.65</b>
23,9,10	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	60	<b>391.10</b>	<b>564.68</b>	<b>931.34</b>

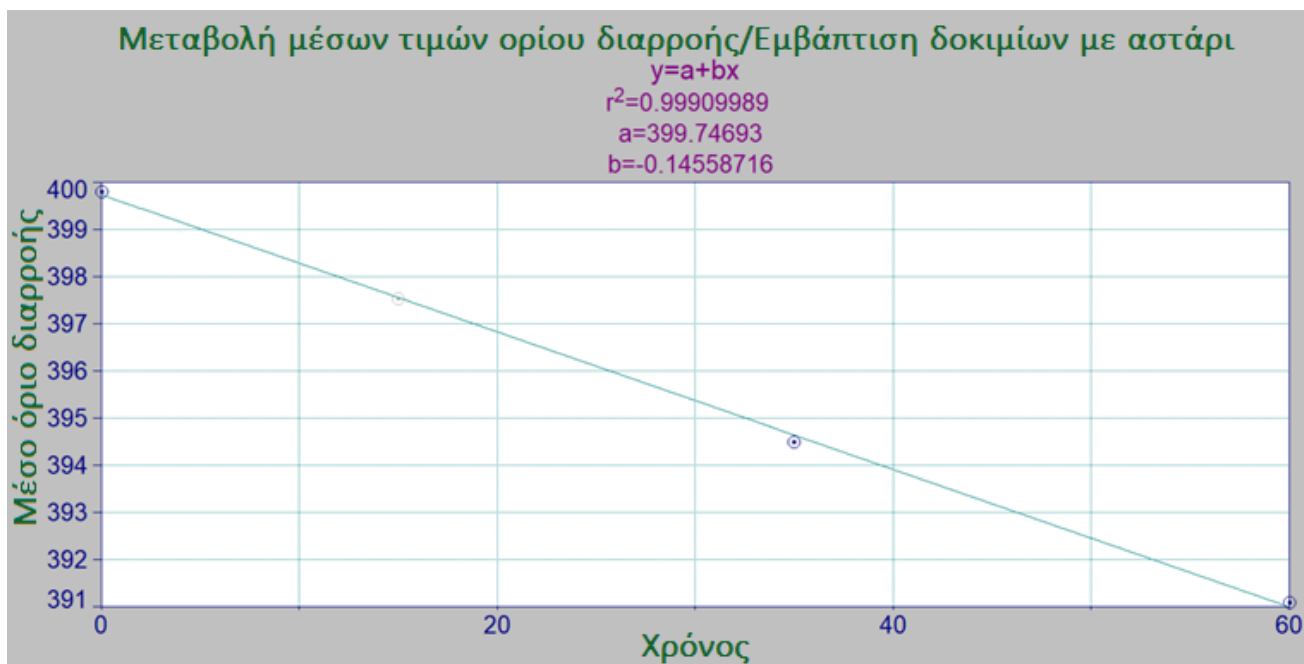
Πίνακας 8.11: Συνοπτικός πίνακας μέσων τιμών μηχανικών ιδιοτήτων για δοκίμια με αστάρι διαβρωμένα σε λουτρό εμβάπτισης NaCl.

Από τον ανωτέρω πίνακα, γίνεται σαφές πως επιβεβαιώνεται η αρχική μας εκτίμηση σχετικά με την “υποβάθμιση” των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων. Τόσο το όριο διαρροής, όσο η μέγιστη εφελκυστική τάση και η τάση θραύσης μειώνονται σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης.

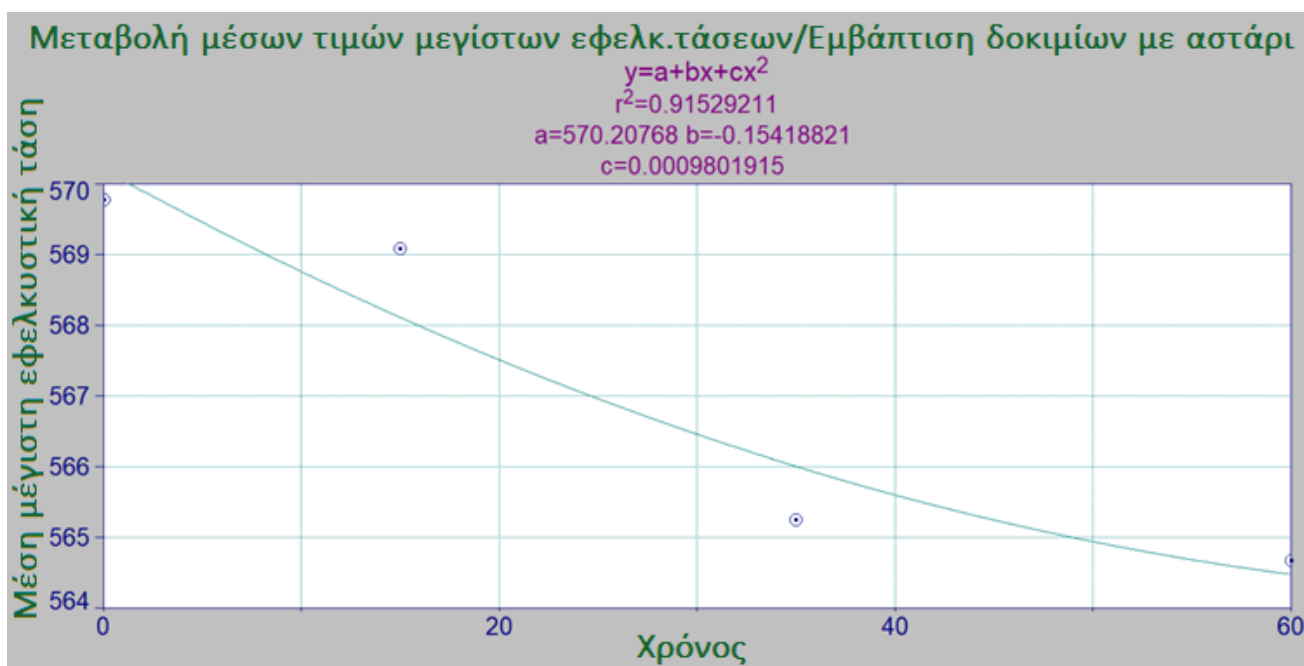
Να σημειωθεί πως αν ελέγξουμε μεμονωμένα τις τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων από τον πίνακα 8.10, υπάρχουν δοκίμια τα οποία αν και έχουν διαβρωθεί για μεγαλύτερο διάστημα, έχουν καλύτερες μηχανικές ιδιότητες από κάποια άλλα δοκίμια τα οποία έχουν διαβρωθεί για μικρότερο χρονικό διάστημα. Κάτι τέτοιο είναι πιθανό να συμβαίνει σε μία πειραματική διαδικασία, ωστόσο το τελικό αποτέλεσμα από ένα μεγαλύτερο δειγματοληπτικό σύνολο δοκιμίων οδηγεί σε αντίστοιχα συμπεράσματα με του πίνακα 8.11 και με ακόμη μεγαλύτερη ακρίβεια.

Στη συνέχεια, παραθέτουμε τα διαγράμματα μεταβολής των μέσων μηχανικών ιδιοτήτων για τα δοκίμια με αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε λουτρό NaCl. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν τα ακόλουθα διαγράμματα μεταβολής:

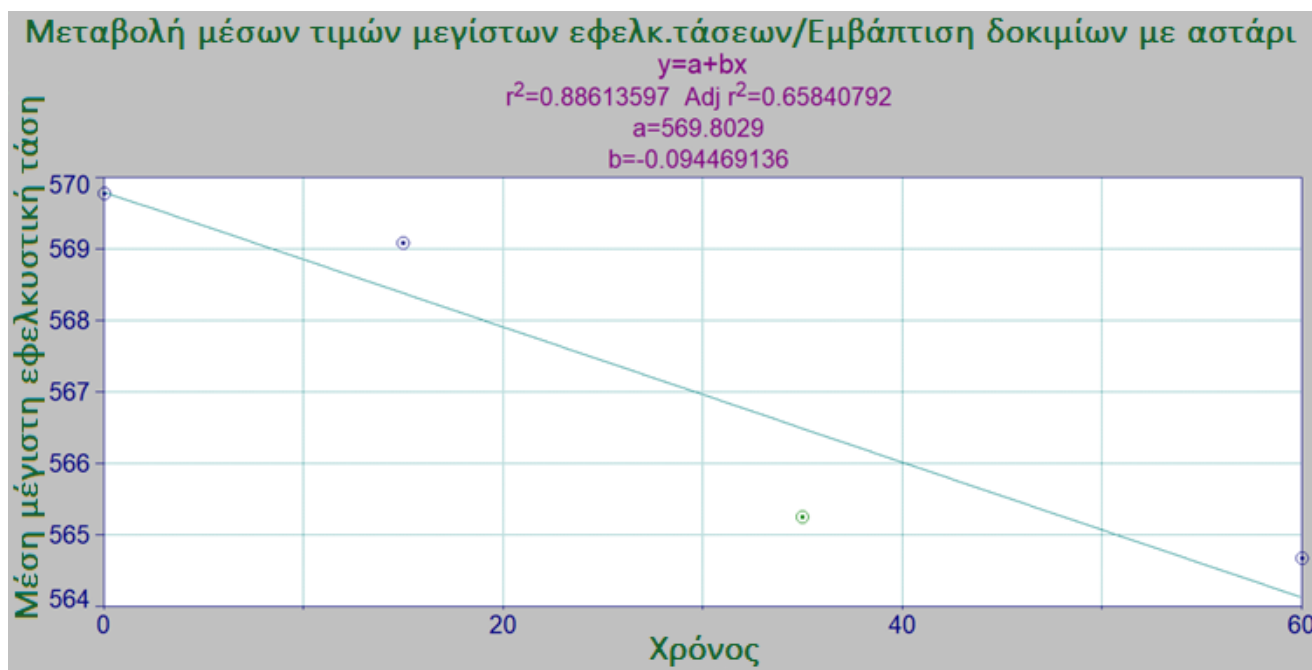
- I. Μέσων τιμών ορίων διαρροής σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης
- II. Μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης
- III. Μέσων τιμών τάσεων θραύσης σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης



Διάγραμμα 8.12: Καμπύλη μεταβολής μέσων τιμών ορίων διαρροής δοκιμίων με αστάρι – Λουτρό εμβάπτισης NaCl



Διάγραμμα 8.13: Καμπύλη μεταβολής μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων δοκιμίων με αστάρι – Λουτρό εμβάπτισης NaCl.



Διάγραμμα 8.14: Καμπύλη μεταβολής μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων δοκιμίων με αστάρι – Λουτρό εμβάπτισης NaCl – Γραμμική προσέγγιση.



Εικόνα 8.15: Ραβδόγραμμα μεταβολής μέσων τιμών τάσεων θραύσης δοκιμίων με αστάρι – Λουτρό εμβάπτισης NaCl

**Συμπέρασμα:** Από τα διαγράμματα 8.12, 8.13, 8.14 και 8.15 επαληθεύονται οι αρχικές μας εκτιμήσεις σχετικά με τη μεταβολή των μέσων μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων. Τόσο το όριο διαρροής, όσο η μέγιστη εφελκυστική τάση και η τάση θραύσης παρουσιάζουν σταδιακή εξασθένηση με την αύξηση του χρόνου έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Αξίζει να τονιστεί πως για τη μεταβολή των μέσων εφελκυστικών τάσεων το ακριβέστερο μοντέλο περιγράφεται μέσω του διαγράμματος 8.13 , το οποίο παρουσιάζει καλύτερη προσαρμογή σε σχέση με το διάγραμμα 8.14. Συγκεκριμένα, η καμπύλη του διαγράμματος 8.13 είναι δεύτερου βαθμού και παρουσιάζει καλύτερη προσαρμογή σε σχέση με τη γραμμική προσέγγιση που παρατίθεται για λόγους πληρότητας στο διάγραμμα 8.14. Αυτό εύκολα συνεπάγεται από το συντελεστή  $r^2$  ο οποίος ονομάζεται adjustment factor και πρέπει σε κάθε περίπτωση να είναι μεγαλύτερος από την τιμή 0.85. Στο διάγραμμα 8.14 ο συντελεστής αυτός λαμβάνει την τιμή 0.6584 , συνεπώς η γραμμική προσέγγιση παρουσιάζει μεγάλες αποκλίσεις σε σχέση με την πραγματική εξέλιξη του φαινομένου, σε αντίθεση με το διάγραμμα 8.13 όπου ο παράγοντας προσαρμογής λαμβάνει την αποδεκτή τιμή 0.9153.

Τέλος, η μέση τάση θραύσης των δοκιμών με αστάρι παρουσιάζει ένα μεγάλο άλμα εξασθένησης μεταξύ των αδιάβρωτων δοκιμών και εκείνων που διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης για 15 ημέρες. Αυτό μπορεί να οφείλεται λόγω της ταχείας ανάπτυξης ψαθυρών μικρορωγμών, οι οποίες οδηγούν σε απότομη υποβάθμιση των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών. Μεταξύ των 35 και 60 ημερών διάβρωσης, παρατηρείται πολύ μικρή μείωση της τάσης θραύσης, γύρω στο 1/16 της αρχικής που πραγματοποιείται μεταξύ 0-15 ημέρες διάβρωσης. Αυτό οφείλεται στην παθητικοποίηση των μεταλλικών επιφανειών των δοκιμών για χρόνους διάβρωσης μεγαλύτερους από 35 ημέρες.

## 8.10 Μελέτη μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμών χωρίς αστάρι λόγω εμβάπτισης σε λουτρό NaCl

Στη συνέχεια παρατίθεται ο συνοπτικός πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων 8.15 όπου παρουσιάζονται ο αριθμός του δοκιμίου, η μέθοδος διάβρωσης, ο χρόνος έκθεσης καθώς και οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών που αναφέρονται, με σκοπό την ενδελεχή εξέταση της μεταβολής τους. Στην προκειμένη ενότητα, παραθέτουμε αναλυτικά το μηχανισμό διάβρωσης μέσω εμβάπτισης σε λουτρό NaCl για δοκίμια χωρίς αστάρι.

Κατ'απόλυτη συμφωνία με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 8.8, εκτός από το συνοπτικό πίνακα μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων, θα ακολουθήσει παρουσίαση καμπυλών του επιβαλλόμενου φορτίου συναρτήσει της επιμήκυνσης των δοκιμών καθώς και καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης, οι οποίες διαμορφώθηκαν με επεξεργασία των πρώτων σε λογιστικό φύλλο excel. Στη συνέχεια, με κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και χρήση των λογισμικών TableCurve και excel, θα παρατεθούν οι προκύπτουσες καμπύλες μεταβολής των μέσων τιμών ορίων διαρροής  $\sigma_y$ , των μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων  $\sigma_{UTS}$  καθώς και των μέσων τάσεων θραύσεως των δοκιμών συναρτήσει του χρόνου έκθεσης . Για λόγους οικονομίας, αναφέρεται συνοπτικά πως το θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο θα ακολουθηθεί για την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έχει ήδη αναλυθεί και εξηγηθεί στην ενότητα 8.8 σχετικά με τη μελέτη της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμών με αστάρι λόγω διάβρωσης σε λουτρό NaCl. Προφανώς, τα πειραματικά αποτελέσματα θα σχολιαστούν και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα μας δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για τη λειτουργία των μηχανισμών διάβρωσης και την επίδρασή τους στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών χάλυβα.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε και στην προκειμένη περίπτωση είναι το λογιστικό φύλλο του excel, το οποίο χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να μετατρέψουμε τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων εφελκυστικής δύναμης-επιμήκυνσης στα αντίστοιχα

διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης. Αξίζει να τονιστεί, πως για κάθε δοκίμιο, για τον υπολογισμό των καμπυλών τάσης – παραμόρφωσης έπρεπε να υπολογιστεί σε πρώτη φάση η διατομή μετά το διάστημα έκθεσης σε διάβρωση και πριν την έναρξη της εφελκυστικής καταπόνησης ώστε να «διορθώσουμε» τις τιμές των τάσεων που είχαν προκύψει για μια αρχικά σταθερή διατομή που είχε επιλεγεί από το λογισμικό της μηχανής εφελκυσμού. Η μεταβολή της διατομής των δοκιμίων είναι απολύτως λογική και οφείλεται στην απώλεια μάζας λόγω του φαινομένου διάβρωσης.

Τέλος, όσον αφορά τη μελέτη των τάσεων θραύσης των δοκιμίων, υπολογίστηκαν αρχικά όλες οι διατομές στην περιοχή θραύσης των δοκιμίων και στη συνέχεια, με τη βοήθεια του διαγράμματος εφελκυστικής δύναμης – επιμήκυνσης, βρέθηκε διαγραμματικά η τιμή της δύναμης εκείνης στην οποία πραγματοποιείται η θραύση των δοκιμίων. Η δύναμη αυτή αντιστοιχεί στην τιμή εκείνη όπου η επιμήκυνση του δοκιμίου παραμένει πρακτικά σταθερή. Στη συνέχεια, διαιρώντας αυτή την τιμή της εφελκυστικής δύναμης θραύσης του δοκιμίου με τη διατομή του λαϊμού στην περιοχή της θραύσης, υπολογίστηκε για κάθε δοκίμιο ξεχωριστά η τάση θραύσης που είναι και το τελικό ζητούμενο.

Ακολουθεί ο συνοπτικός πίνακας μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων χωρίς αστάρι τα οποία διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης NaCl.

ΔΟΚΙΜΙΑ ΧΩΡΙΣ ΑΣΤΑΡΙ								
Αριθμός δοκιμίου	Μέθοδος διάβρωσης	Χρόνος έκθεσης [Ημέρες]	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	Τάση θραύσης $\sigma_\theta$ [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]
2	Χωρίς διάβρωση	0	386.41	25.30	560.76	1050.72	48.76	119.63
3	Χωρίς διάβρωση	0	403.39	25.37	570.18	1039.84	51.95	114.47
4	Χωρίς διάβρωση	0	409.63	25.12	578.43	1028.36	50.33	108.87
15	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	15	392.18	24.34	560.03	1015.79	49.96	104.93
26	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	15	406.15	26.33	575.44	1016.77	50.24	118.89
29	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	15	389.60	25.25	570.94	947.89	51.70	116.59
13	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	35	396.41	26	570.61	929.23	50.76	118.98
25	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	35	384.66	24.72	565.81	929.51	50.31	111.09
18	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	35	396.16	24.68	568.99	913.66	50.24	113.42
27	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	60	387.59	24.92	564.83	899.43	48.81	112.49
17	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	60	388.03	24.59	565.84	915.41	49.99	109.43
14	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	60	388.35	24.72	566.60	931.01	49.87	114.82

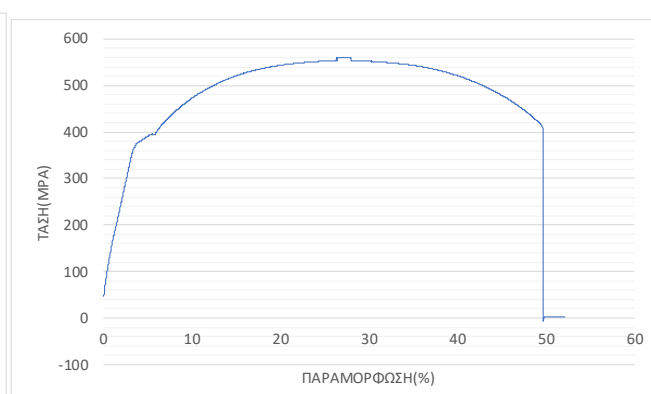
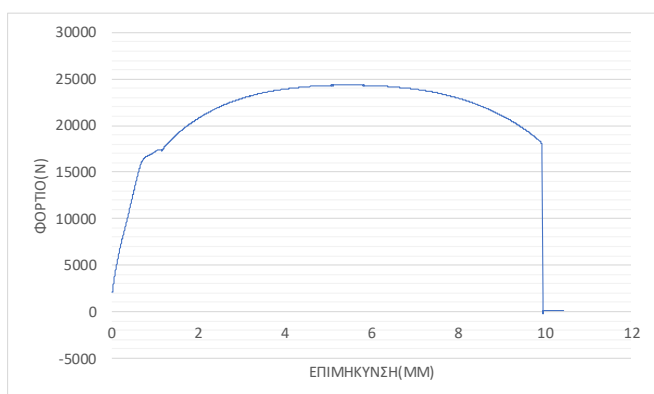
Πίνακας 8.16: Συνοπτικός πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων για δοκίμια χωρίς αστάρι διαβρωμένα σε λουτρό εμβάπτισης NaCl.

Στη συνέχεια, παραθέτουμε τις καμπύλες μεταβολής της επιβαλλόμενης δύναμης συναρτήσει της επιμήκυνσης των δοκιμίων, καθώς και τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης, βάσει των οποίων προέκυψαν οι 3 βασικές μηχανικές ιδιότητες που αναφέρθηκαν ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_{UTS}$ ,  $\sigma_\theta$ ) καθώς και η % παραμόρφωση των δοκιμίων μέχρι την αστοχία αλλά και η ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση (J).

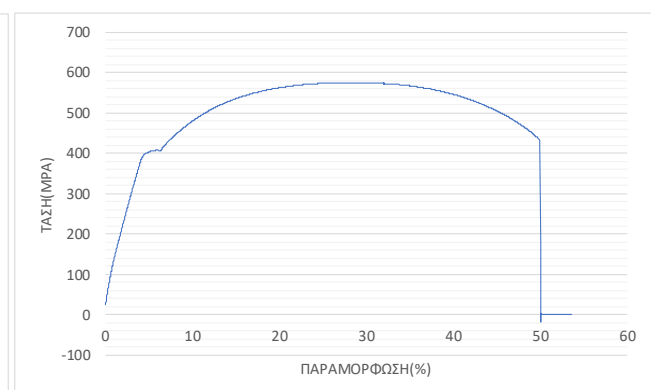
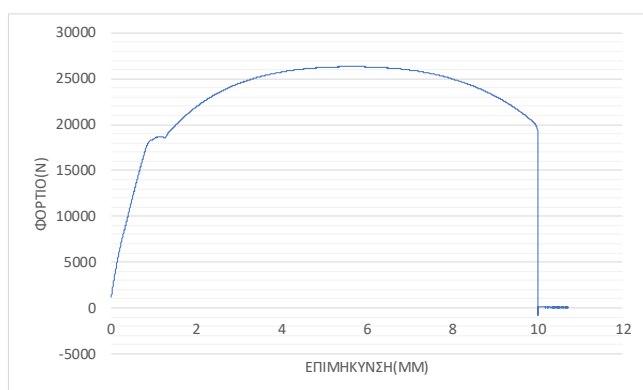
Τα δοκίμια στα οποία θα αναφέρονται οι παρακάτω καμπύλες είναι αυτά που παρουσιάστηκαν στο συνοπτικό πίνακα 8.15, εκείνα δηλαδή τα οποία διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης NaCl και έχουν ψηφματοβοληθεί (δοκίμια χωρίς αστάρι).



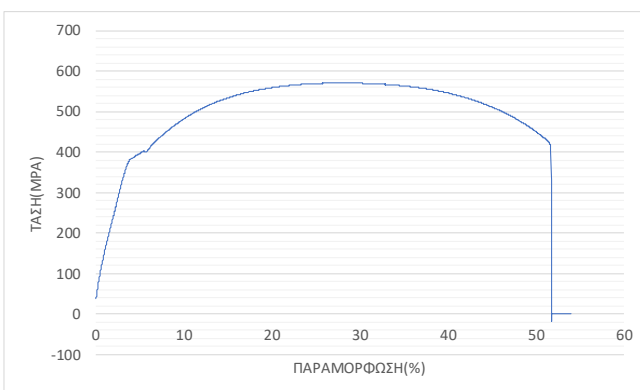
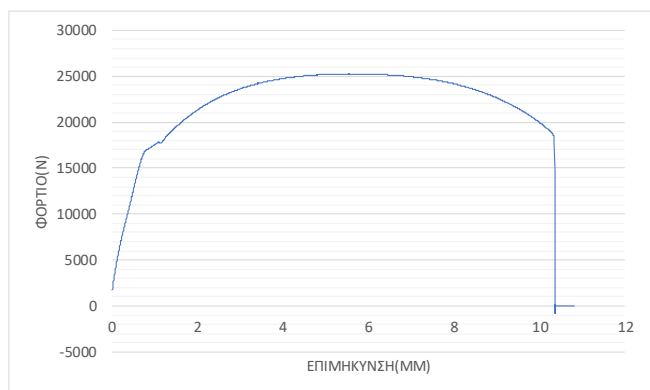
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
15	392.18	24.34	560.03	49.96	104.93	1015.79



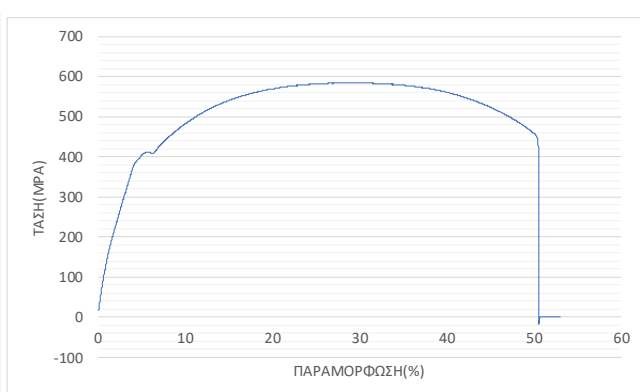
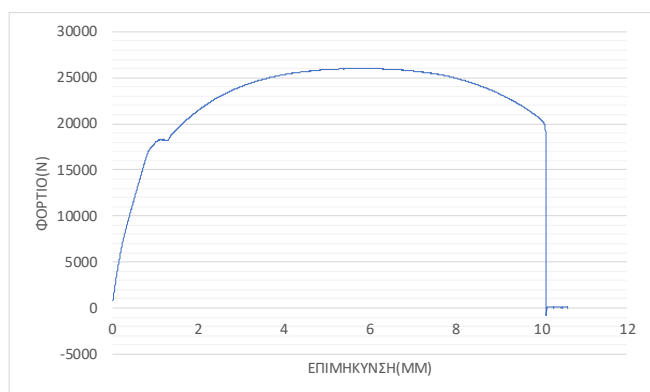
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
26	406.15	26.33	575.44	50.24	118.89	1016.77



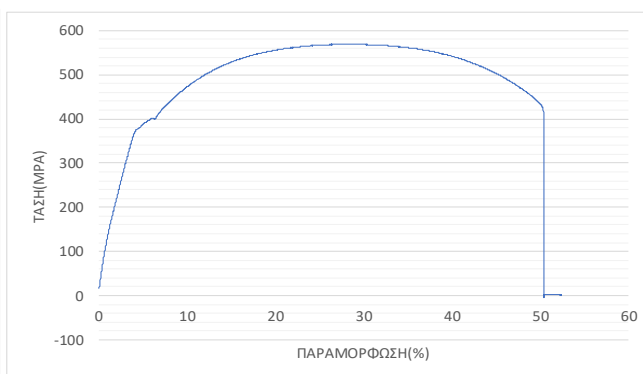
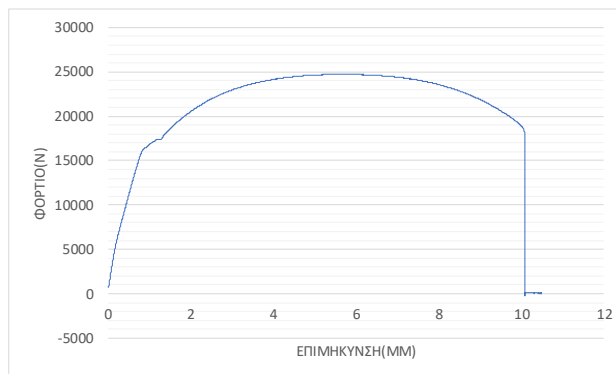
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
29	389.60	25.25	570.94	51.70	116.59	947.89



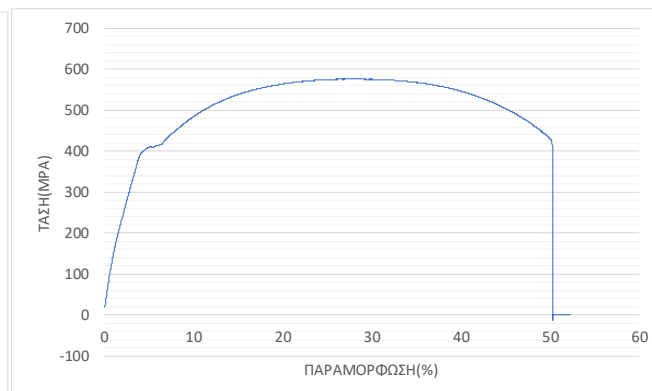
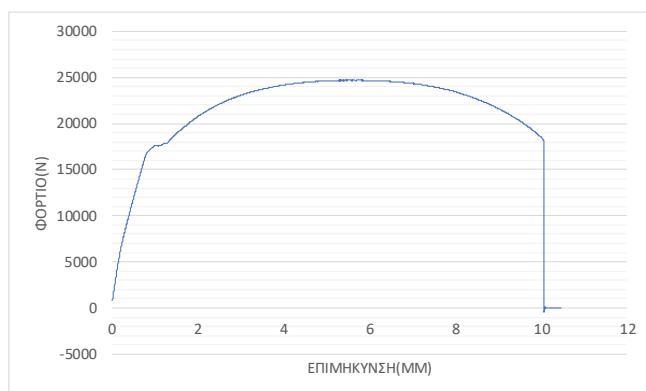
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
13	396.41	26	570.61	50.76	118.98	929.23



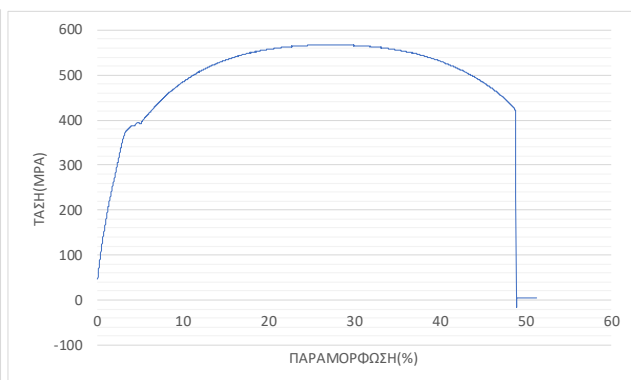
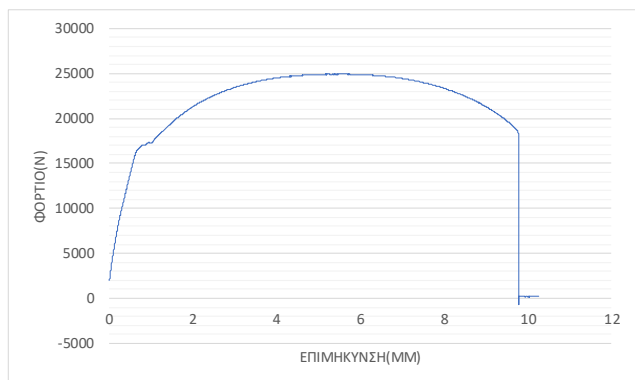
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
25	384.66	24.72	565.81	50.31	111.09	929.51



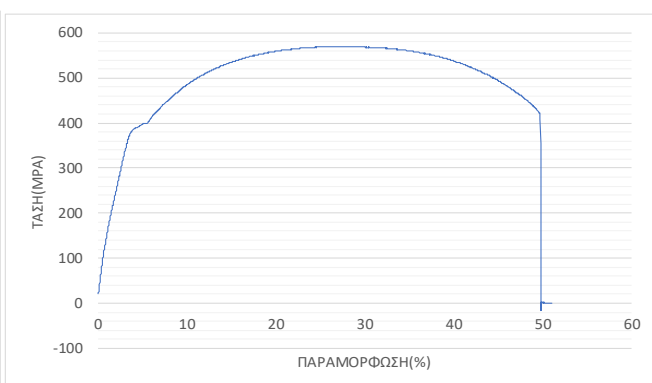
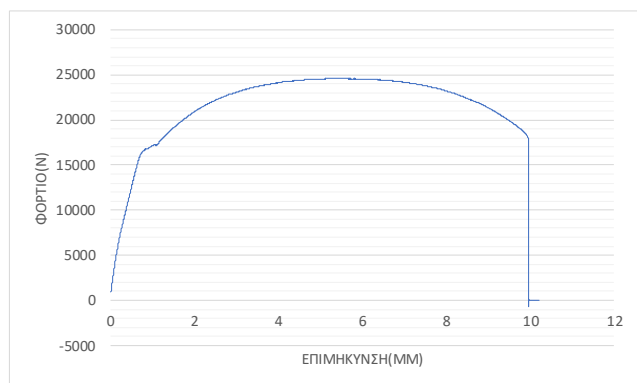
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
18	396.16	24.68	568.99	50.24	113.42	913.66



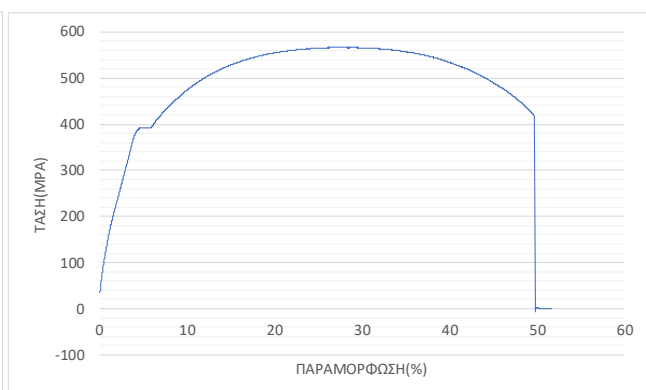
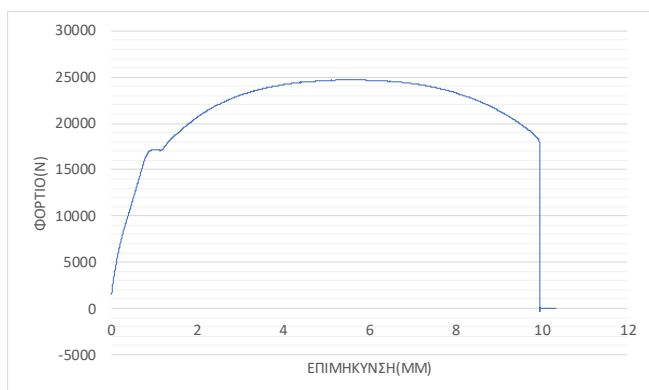
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
27	387.59	24.92	564.83	48.81	112.49	899.43



Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
17	388.03	24.59	565.84	49.99	109.43	915.41



Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
14	388.35	24.72	566.60	49.87	114.82	931.01



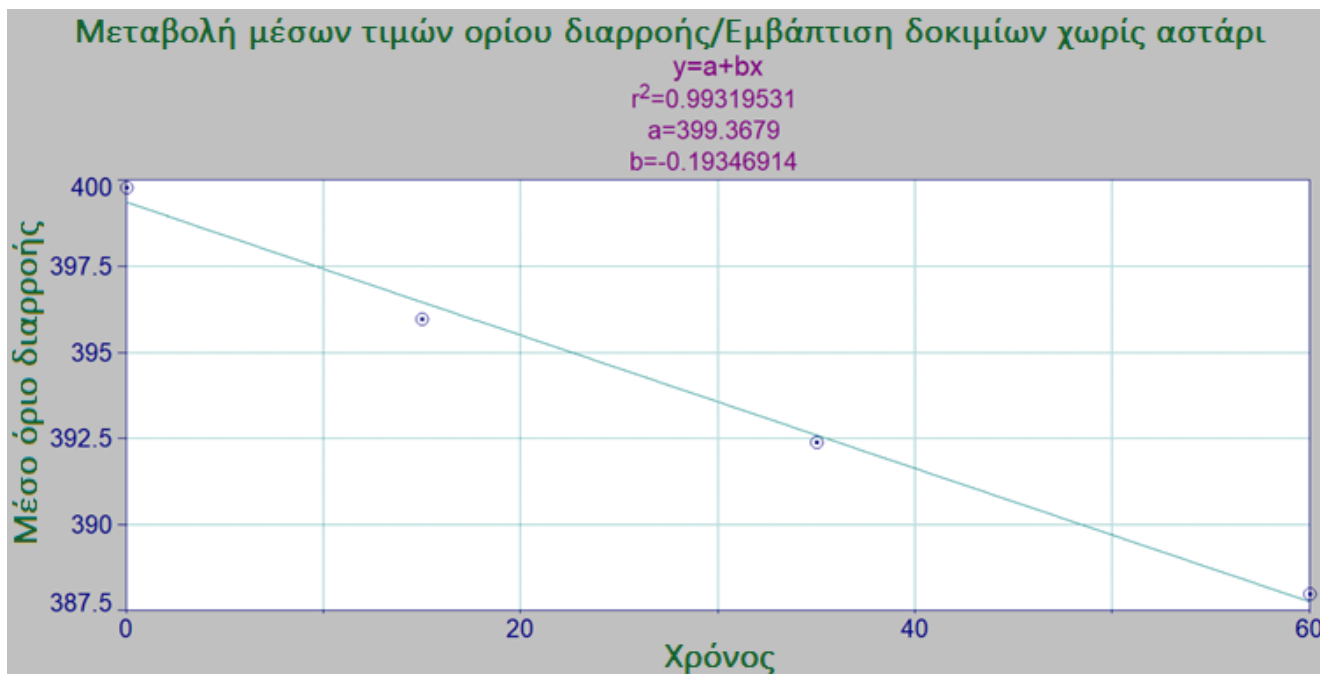
### 8.11 Αναλυτική παρουσίαση μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων χωρίς αστάρι λόγω εμφάνισης σε λουτρό NaCl με χρήση λογισμικού TableCurve-Excel

ΔΟΚΙΜΙΑ ΧΩΡΙΣ ΑΣΤΑΡΙ					
Αριθμός δοκιμίων	Μέθοδος διάβρωσης	Χρόνος έκθεσης [Ημέρες]	Μέση τιμή ορίου διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέση τιμή μέγιστης εφελκυστικής τάσης ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	Μέση τάση θραύσης $\sigma_B$ [MPa]
2,3,4	Χωρίς διάβρωση	0	<b>399.81</b>	<b>569.79</b>	<b>1039.64</b>
15,26,29	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	15	<b>395.98</b>	<b>568.80</b>	<b>993.48</b>
13,25,18	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	35	<b>392.41</b>	<b>568.47</b>	<b>924.13</b>
27,17,14	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	60	<b>387.99</b>	<b>565.76</b>	<b>915.28</b>

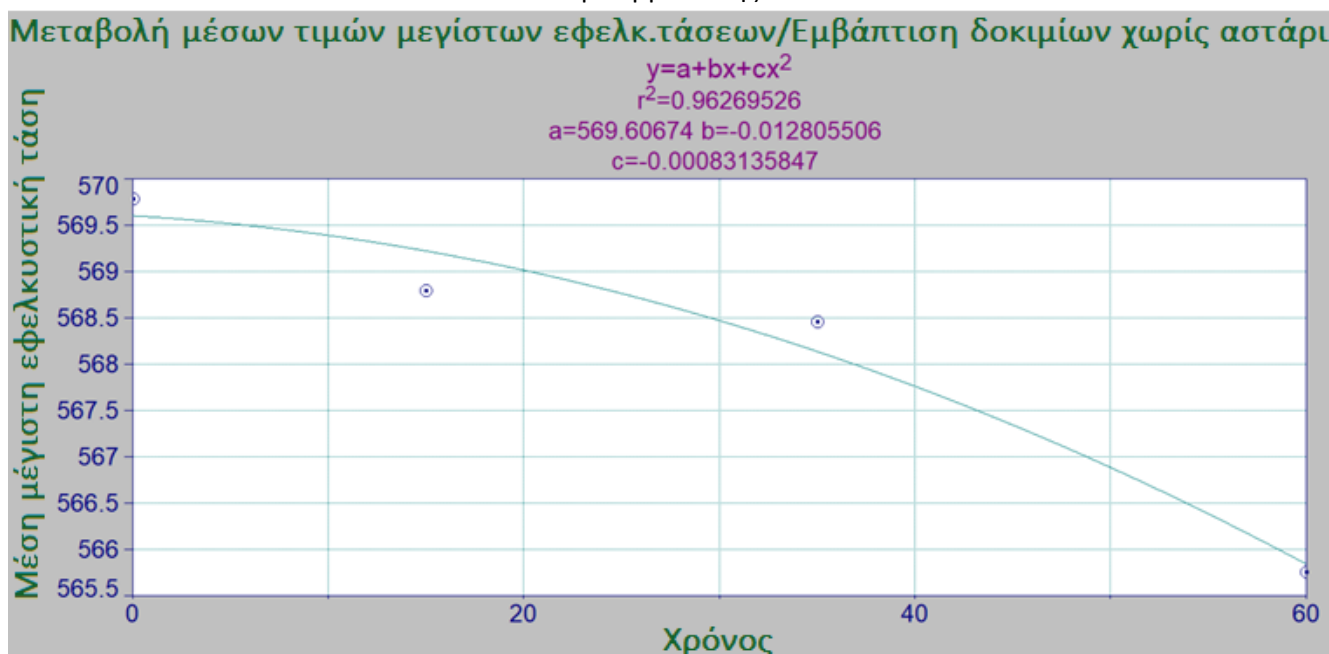
Πίνακας 8.17: Συνοπτικός πίνακας μέσων τιμών μηχανικών ιδιοτήτων για δοκίμια χωρίς αστάρι διαβρωμένα σε λουτρό εμφάνισης NaCl.

Στη συνέχεια, παραθέτουμε τα διαγράμματα μεταβολής των μέσων μηχανικών ιδιοτήτων για τα δοκίμια χωρίς αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε λουτρό NaCl. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν οι ακόλουθες καμπύλες μεταβολής:

- I. Μέσων τιμών ορίων διαρροής σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης
- II. Μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης
- III. Μέσων τάσεων θραύσης σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης

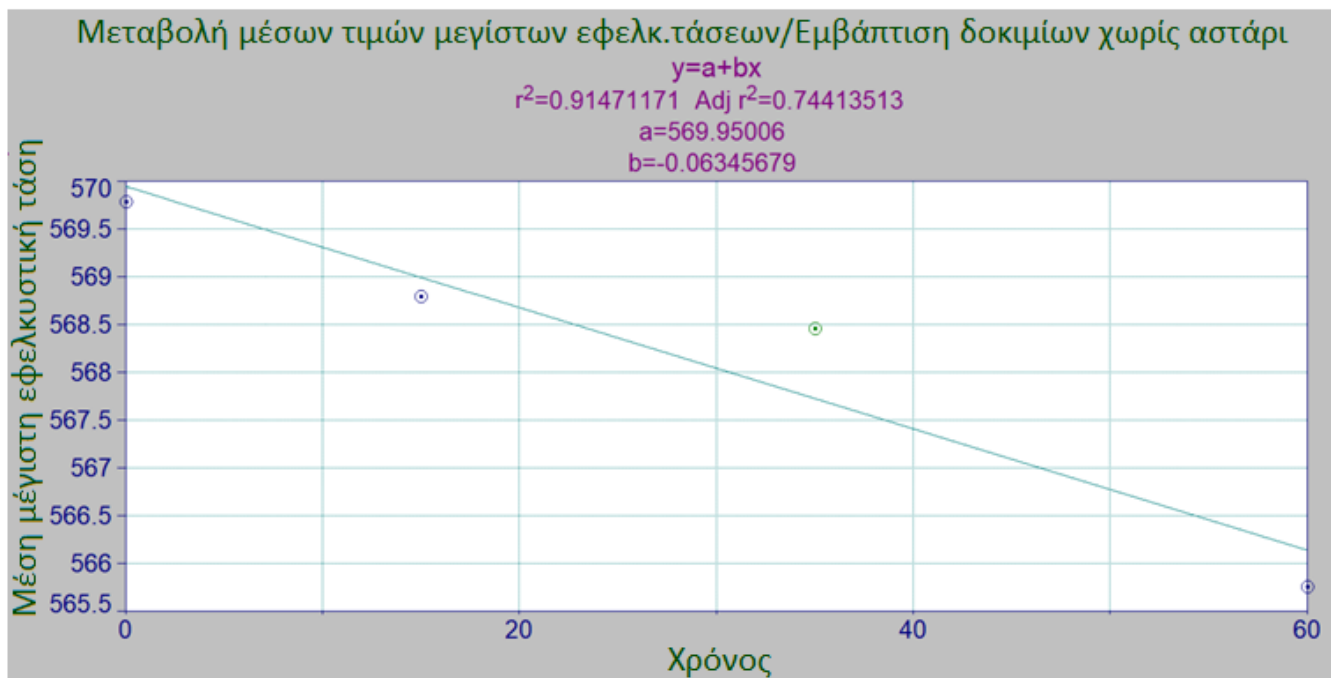


Διάγραμμα 8.18: Καμπύλη μεταβολής μέσων τιμών ορίων διαρροής δοκιμίων χωρίς αστάρι – Λουτρό εμβάπτισης NaCl

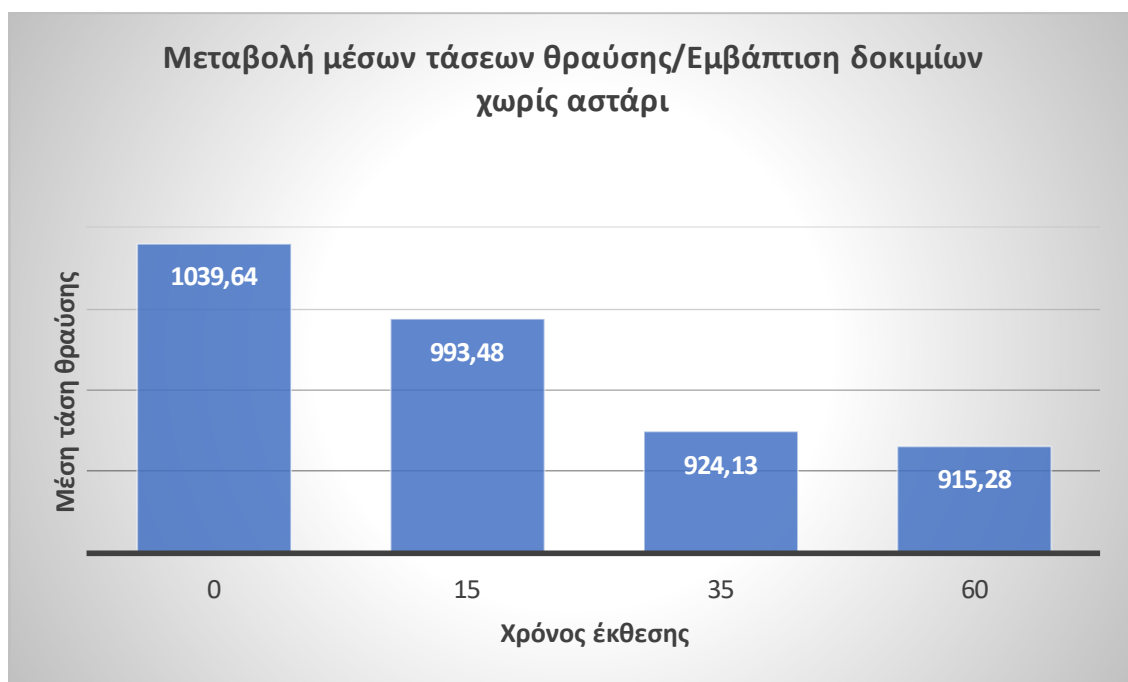


Διάγραμμα 8.19: Καμπύλη μεταβολής μέσων μεγίστων εφελκυστικών τάσεων δοκιμίων χωρίς αστάρι – Λουτρό εμβάπτισης NaCl





Διάγραμμα 8.20: Καμπύλη μεταβολής μέσων μεγίστων εφελκυστικών τάσεων δοκιμών χωρίς αστάρι – Λουτρό εμβάπτισης NaCl – Γραμμική προσέγγιση.



Εικόνα 8.21: Ραβδόγραμμα μεταβολής μέσων τιμών τάσεων θραύσης δοκιμών χωρίς αστάρι – Λουτρό εμβάπτισης NaCl

**Συμπέρασμα:** Όπως και στην ενότητα 8.9 έτσι και στην περίπτωση των δοκιμών χωρίς αστάρι, το μέσο όριο διαρροής το οποίο παρατίθεται στο διάγραμμα 8.18 μειώνεται με γραμμικό ρυθμό.

Ένα ακόμη χρήσιμο συμπέρασμα το οποίο προκύπτει από τη σύγκριση των διαγραμμάτων 8.12 και 8.18 τα οποία αναφέρονται σε δοκίμια με και χωρίς αστάρι αντίστοιχα, είναι ότι τα δεύτερα παρουσιάζουν μεγαλύτερη εξασθένηση των μηχανικών τους ιδιοτήτων. Κάτι τέτοιο κρίνεται ως ιδιαίτερα φυσιολογικό, καθώς η επιπλέον προστασία που προσδίδει το αστάρι στα δοκίμια έχει ως αποτέλεσμα την επιβράδυνση της εξέλιξης της διάβρωσης σε αυτά, άρα και της υποβάθμισης των μηχανικών τους ιδιοτήτων σε σχέση με τα ψηγματοβολημένα δοκίμια. Για παράδειγμα, για τον ίδιο χρόνο έκθεσης, έστω 35 ημέρες, η μέση τιμή του ορίου διαρροής για τα δοκίμια με αστάρι ανέρχεται στα 394.50 MPa, ενώ για τα δοκίμια χωρίς αστάρι στα 392.41 MPa, τιμή αισθητά χαμηλότερη της πρώτης, αν αναλογιστούμε το σχετικά μικρό διάστημα έκθεσης σε διαβρωτικές συνθήκες.

Επιπλέον, όπως και στην ενότητα 8.9, έτσι και τώρα παρουσιάζονται τα διαγράμματα 8.19 και 8.20 τα οποία αντιστοιχούν στις καμπύλες μεταβολής των μέσων μεγίστων εφελκυστικών τάσεων των δοκιμών χωρίς αστάρι ως προς το χρόνο έκθεσης σε διάλυμα NaCl. Το διάγραμμα 8.20 αντιστοιχεί στη γραμμική προσέγγιση του φαινομένου, η οποία όπως και στην ενότητα 8.9 δεν μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή λόγω του χαμηλού δείκτη προσαρμογής. Πιο συγκεκριμένα, στο διάγραμμα 8.20 ο adjustment factor είναι  $0.7441 < 0.85$ , συνεπώς ο ρυθμός μείωσης της μέσης μέγιστης εφελκυστικής τάσης των δοκιμών προσεγγίζεται καλύτερα με το μοντέλο 2<sup>ου</sup> βαθμού που παρουσιάζεται στο διάγραμμα 8.19.

Τέλος, η τάση θραύσης παρουσιάζει σχετικά μεγάλη εξασθένηση μεταξύ 0-15 και 15-35 ημέρες διάβρωσης. Στις 35 ημέρες έκθεσης, οι μικρορωγμές πλέον έχουν αναπτυχθεί αρκετά και για το λόγο αυτό δεν παρουσιάζεται μεγάλη διακύμανση της τάσης θραύσης στο τελευταίο διάστημα διάβρωσης που είναι οι 60 ημέρες. Αυτό οφείλεται στην παθητικοποίηση των μεταλλικών επιφανειών των δοκιμών για χρόνους διάβρωσης μεγαλύτερους από 35 ημέρες.

## 9. Πείραμα αλατονέφωσης

Η γενική αρχή της μεθόδου διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης περιγράφηκε στο θεωρητικό κομμάτι. Εκεί παραθέσαμε τις βασικές αρχές, τη διάταξη του θαλάμου αλατονέφωσης καθώς και τον τρόπο με τον οποίο ουσιαστικά θέσαμε σε λειτουργία το συγκεκριμένο μηχανισμό διάβρωσης για την εκτέλεση του πειραματικού μέρους το οποίο παρουσιάζεται στη συνέχεια. Επιπρόσθετα, τονίστηκαν τα βασικά μέρη από τα οποία αποτελείται ο θάλαμος αλατονέφωσης και ποιά η χρησιμότητά τους στο κύκλωμα. Τέλος, αναφέρθηκαν οι δύο βασικοί μηχανισμοί διάβρωσης με τη χρήση της αλατονέφωσης, οι δοκιμές σε στατικές συνθήκες και οι δοκιμές σε κυκλικές συνθήκες, οι οποίες διαφέρουν ανάλογα με τη διακύμανση των θερμοκρασιακών επιπέδων καθώς και των αντίστοιχων χρόνων έκθεσης των δοκιμών.

Στο κεφάλαιο αυτό θα παραθέσουμε πειραματικά στοιχεία, πειραματικές καμπύλες και πειραματικά αποτελέσματα διάβρωσης των δοκιμών ναυπηγικού χάλυβα, τα οποία στη συνέχεια θα σχολιαστούν και θα προκύψουν χρήσιμα συμπεράσματα για τη λειτουργία του ναυπηγικού χάλυβα ΑΝ36 έναντι διάβρωσης από το θαλάσσιο περιβάλλον.

Σκοπός του πειράματος αλατονέφωσης είναι να προσδιοριστεί η συμπεριφορά ενός υλικού έναντι διάβρωσης. Στο σημείο αυτό, αξίζει να αναφερθεί ότι οι συνθήκες διάβρωσης που επικρατούν κατά την εκτέλεση του πειράματος αλατονέφωσης είναι μεν σταθερές αλλά χαρακτηρίζονται ως αρκετά πιο «επιθετικές» σε σχέση με τις συνθήκες σε λουτρό εμβάπτισης NaCl. Αυτό, μπορεί εύκολα να επαληθευτεί και στη συνέχεια όπου θα διαπιστώσουμε από τα πειραματικά αποτελέσματα πως ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμών που εκτέθηκαν σε διάβρωση με αλατονέφωση είναι αισθητά μεγαλύτερος από την περίπτωση της διάβρωσης σε λουτρό εμβάπτισης NaCl. Συνεπώς, η διάρκεια ζωής των δοκιμών που εκτέθηκαν στο θάλαμο αλατονέφωσης θα είναι αρκετά μικρότερη συγκριτικά με τα δοκίμια που εκτέθηκαν στο λουτρό εμβάπτισης. Η τοποθέτηση των δοκιμών εντός του θαλάμου καθώς η προετοιμασία και ο καθαρισμός τους έγινε σύμφωνα με το πρότυπο ASTM-B117. Το πρότυπο αυτό χρησιμοποιήθηκε ως βάση για το σύνολο της πειραματικής διαδικασίας. Κάποιες από τις πειραματικές διατάξεις που αξιοποιήθηκαν στα πλαίσια της παρούσας διπλωματικής εργασίας ήταν προτυποποιημένες κατά ASTM όπως και οι διαδικασίες μετρήσεων και αξιολόγησης αυτών. Μία από αυτές, ήταν η διάταξη της αλατονέφωσης, με εξοπλισμό του εργαστηρίου. Έγινε επίσης χρήση αυτοσχέδιων πειραματικών διατάξεων που στόχο είχαν την προσομοίωση των βιομηχανικών συνθηκών και επέτρεψαν να αξιολογηθούν πειραματικά υποθέσεις για τα φαινόμενα που λαμβάνουν χώρα στις σχετικές θαλάσσιες μεταφορές. Επίσης έδωσαν μία πρώτη εκτίμηση της αποτελεσματικότητας μεθόδων προστασίας της μεταλλικής κατασκευής του πλοίου έναντι διάβρωσης σε ειδικές συνθήκες.

## 9.1 Διάταξη πειράματος αλατονέφωσης δοκιμών μικρών διαστάσεων για μελέτη απώλειας μάζας

Η αναλυτική διάταξη του συστήματος διάβρωσης μέσω αλατονέφωσης αναφέρθηκε με αρκετή λεπτομέρεια στην ενότητα 4.1. Στο σημείο αυτό, θα επικεντρωθούμε περισσότερο στα βήματα που ακολουθήθηκαν προκειμένου τα δοκίμια ναυπηγικού χάλυβα ΑΝ36 να τεθούν υπό την επίδραση διάβρωσης μέσω του μηχανήματος της αλατονέφωσης. Για το πείραμα της αλατονέφωσης των χαλύβδινων δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν αυτοσχέδιες διατάξεις. Πιο συγκεκριμένα, αποφασίστηκε η χρήση κατάλληλα τοποθετημένων «εξεδρών» θερμοπλαστικού πολυμερούς (διογκώμενη πολυστερίνη) στον πυθμένα του θαλάμου αλατονέφωσης ώστε να αποφευχθούν τόσο προβλήματα χωροταξίας στο εσωτερικό του μηχανήματος, όσο και προβλήματα τα οποία θα μπορούσαν να προκληθούν σε κάποιο άλλο υλικό το οποίο θα εκτίθεντο για μεγάλο χρονικό διάστημα σε θαλάσσιο διαβρωτικό περιβάλλον. Αυτό το θερμοπλαστικό υλικό που χρησιμοποιήσαμε δεν παράγει προϊόντα διάβρωσης σε βαθμό τέτοιο ώστε να επηρεάζει τα πειραματικά μας αποτελέσματα, καθώς και δεν υφίσταται κάποια επίδραση λόγω της σχετικά υψηλής θερμοκρασίας στο εσωτερικό του θαλάμου (για τους χρόνους διάβρωσης που μελετάμε) μιας και πρόκειται για θερμομονωτικό υλικό. Επιπλέον, τα δοκίμια μικρών διαστάσεων με αστάρι προφανώς τοποθετήθηκαν χωριστά από τα δοκίμια χωρίς αστάρι καθώς ο ρυθμός διάβρωσης τους θα ήταν διαφορετικός, ενώ το γεγονός πως οι αποστάσεις μεταξύ τους πάνω στην εξέδρα πολυμερούς υλικού θα ήταν μικρές, θα υπήρχε ο κίνδυνος ανάπτυξης διαφοράς δυναμικού μεταξύ των διαφορετικά διαβρωμένων επιφανειών τους. Αξίζει να τονιστεί επίσης πως η θερμοκρασία εντός του θαλάμου αλατονέφωσης διατηρήθηκε σε σχετικά σταθερά επίπεδα, όπως επίσης και το διάλυμα χλωριούχου νατρίου είχε σχετικά σταθερή περιεκτικότητα ενώ πραγματοποιούνταν και συχνές ανανεώσεις του διαλύματος μέσω προσθήκης NaCl. Τέλος,

αν και το θερμοπλαστικό υλικό που τοποθετήθηκε στον πυθμένα του θαλάμου αλατονέφωσης κρίθηκε ιδανικό για τη συγκεκριμένη πειραματική διαδικασία, δεν πρέπει να ξεχνάμε πως η διεπαφή του υλικού με τις μεταλλικές επιφάνειες συνέβαλε, έστω και σε μικρό ποσοστό, στην περαιτέρω αύξηση του ρυθμού και των προϊόντων διάβρωσης στα δοκίμια μικρών διαστάσεων. Στη συνέχεια παρατίθενται 3 εικόνες ώστε να γίνει περισσότερο κατανοητή η πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε, εντός του θαλάμου αλατονέφωσης.



Εικόνα 9.1: Γενική διάταξη εσωτερικού πυθμένα θαλάμου αλατονέφωσης



Εικόνα 9.2: Τα αριθμημένα δοκίμια με αστάρι πάνω στην «εξέδρα» πολυμερούς



Εικόνα 9.3: Τα αριθμημένα δοκίμια χωρίς αστάρι πάνω στην «εξέδρα» πολυμερούς

## 9.2 Εκτέλεση πειράματος αλατονέφωσης δοκιμίων μικρών διαστάσεων

Τα δοκίμια τα οποία εκτέθηκαν στο πείραμα αλατονέφωσης χωρίστηκαν σε 2 μεγάλες κατηγορίες ανάλογα την προεργασία που είχε γίνει πριν αυτά αρχίσουν να διαβρώνονται στο θάλαμο αλατονέφωσης. Έτσι, προέκυψαν τα δοκίμια εκείνα τα οποία απλώς κόπηκαν με τη χρήση σέγας, στο εξής θα αναφέρονται ως δοκίμια μικρών διαστάσεων με αστάρι, καθώς και τα δοκίμια εκείνα τα οποία μετά την κοπή από τη σέγα, ψηγματοβολήθηκαν και στη συνέχεια μονώθηκαν κατάλληλα περιμετρικά με χρήση ακρυλικού διαλύματος καθώς και επικαλύφθηκαν με κερί. Τα τελευταία στο εξής θα αναφέρονται ως δοκίμια μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι. Επειδή η μάζα τους είναι σχετικά μεγάλη ενώ ο αναμενόμενος ρυθμός διάβρωσης μικρός, λόγω των ιδανικών συνθηκών διάβρωσης που επικρατούν εντός του θαλάμου, κρίθηκε σκόπιμο να εκτεθούν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Παρ'όλα αυτά, πρέπει να επισημανθεί ότι ο ρυθμός διάβρωσης εντός του θαλάμου αλατονέφωσης είναι αισθητά μεγαλύτερος από το ρυθμό διάβρωσης των δοκιμίων εντός του λουτρού εμβάπτισης NaCl, πράγμα που θα διαπιστωθεί και στη συνέχεια όταν παρατεθούν τα αντίστοιχα πειραματικά δεδομένα. Με βάση πρότυπα έκθεσης χαλύβδινων δοκιμίων σε συνθήκες θαλάσσιας διάβρωσης, αποφασίστηκε οι χρόνοι έκθεσης να είναι καθορισμένοι σε ημέρες και πιο συγκεκριμένα στα ακόλουθα 4 χρονικά διαστήματα:

1. 0 – 20 ημέρες έκθεσης
2. 20 – 40 ημέρες έκθεσης
3. 40 – 60 ημέρες έκθεσης
4. 60 – 75 ημέρες έκθεσης

Τη χρονική στιγμή «0» θεωρούμε ότι τα δοκίμια τα οποία διαθέτουμε για να ξεκινήσουν την έκθεσή τους στην αλατονέφωση είναι εντελώς αδιάβρωτα, αμελούμε δηλαδή ακόμη και το



ενδεχόμενο διάβρωσης λόγω έκθεσης στον ατμοσφαιρικό αέρα πριν αυτά τοποθετηθούν στην αλατονέφωση. Συνεπώς, η απώλεια μάζας των δοκιμίων για χρόνο «0» θα είναι προφανώς μηδέν.

Μετά το πέρας κάθε απαιτούμενου χρονικού διαστήματος έκθεσης στην αλατονέφωση, τα δοκίμια μικρών διαστάσεων απομακρύνονταν από το θάλαμο, καθαρίζονταν με νερό όσμωσης και ειδικούς σπόγγους ώστε να απομακρυνθούν τα επιφανειακά οξειδία και προϊόντα διάβρωσης τα οποία επικάθονταν στην επιφάνειά τους. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετούνταν σε κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο στεγνώματος για κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα, με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας και διαφόρων εγκλεισμάτων στην πορώδη επιφάνειά τους. Σε περίπτωση που δεν γινόταν πλήρης απομάκρυνση της υγρασίας, εγκυμονούσε ο κίνδυνος περαιτέρω οξείδωσης των δοκιμίων λόγω των ιδιαίτερα ευνοϊκών συνθηκών διάβρωσης που θα αναπτύσσονταν στη χαρακτηριστική τριεπιφάνεια μέταλλο-νερό-αέρας.

Ειδικά για τα δοκίμια χωρίς αστάρι, λόγω της μόνωσης που πραγματοποιήθηκε με ακρυλικό διάλυμα και κερί στις πλευρικές τους επιφάνειες, ακολούθησε εμβάπτιση των δοκιμίων αυτών σε διάλυμα ακετόνης με σκοπό την πλήρη απομάκρυνση τριμμάτων κεριού που παρέμειναν και μετά την πλύση τους με νερό όσμωσης. Όταν ολοκληρώθηκε η απομάκρυνση του κεριού, στη συνέχεια τα δοκίμια χωρίς αστάρι υπέστησαν χημικό καθαρισμό με διάλυμα υδροχλωρικού οξέως με σκοπό την πλήρη απομάκρυνση των προϊόντων οξείδωσης τα οποία παρέμειναν στις απροστάτευτες επιφάνειές τους μετά την αρχική τους πλύση.

Μετά το χημικό καθαρισμό των ψηγματοβολημένων δοκιμίων μικρών διαστάσεων, ακολουθεί κατά τα γνωστά η διαδικασία του στεγνώματος ώστε να απομακρυνθούν εγκλείσματα υγρασίας, τα οποία καταλαμβάνουν πορώδη τμήματα των επιφανειών και οδηγούν σε σταδιακή υποβάθμιση της ποιότητάς τους, ενώ συγχρόνως μεταβάλλουν τη μάζα τους λόγω της περαιτέρω οξείδωσης που πραγματοποιούν.

Μετά την ολοκλήρωση του στεγνώματος των δοκιμίων, ακολουθούσε η ζύγισή τους και κατ'έπείτα, η εύρεση της απώλειας μάζας. Για την πληρότητα των πειραματικών αποτελεσμάτων, κρίθηκε σκόπιμος ο υπολογισμός των επιφανειών διάβρωσης των δοκιμίων μικρών διαστάσεων με χρήση ηλεκτρονικού παχυμέτρου, ενώ συγχρόνως υπολογίστηκε ο λόγος της απώλειας μάζας προς τη συνολική επιφάνεια διάβρωσής τους. Με τον τρόπο αυτό, τα πειραματικά μας αποτελέσματα είναι πιο ρεαλιστικά καθώς μας δίνουν συμπεράσματα σχετικά με την ποσοστιαία απώλεια μάζας των δοκιμίων μικρών διαστάσεων και όχι απλώς την απώλεια μάζας.

Ακολουθεί αναλυτικός πίνακας όπου παρουσιάζεται η αρχική μάζα, η μάζα μετά την έκθεση σε διαβρωτικό περιβάλλον και την απομάκρυνση των οξειδίων, η απώλεια μάζας εκφρασμένη απόλυτα, η συνολική επιφάνεια διάβρωσης, η απώλεια μάζας ως προς την επιφάνεια διάβρωσης καθώς και ο χρόνος έκθεσης σε μέρες. Οι τιμές μάζας είναι εκφρασμένες σε [gr] ενώ η απώλεια μάζας ανά μονάδα επιφάνειας είναι εκφρασμένη σε μονάδες  $[gr/cm^2] \cdot 10^{-3}$ . Στην περίπτωση των δοκιμίων χωρίς αστάρι όπου προηγήθηκε διαδικασία μόνωσης, έχει πραγματοποιηθεί διαδικασία αφαίρεσης της μόνωσης, η οποία στη συνέχεια δεν θα μας απασχολήσει καθώς θα παρατεθούν μόνο τα τελικά αποτελέσματα των μαζών των δοκιμίων χωρίς τη μάζα της μόνωσης.



### 9.3 Διάβρωση δοκιμίων μικρών διαστάσεων με αστάρι σε θάλαμο αλατονέφωσης

Αριθμός δοκιμίου	Αρχική μάζα [gr]	Μάζα χωρίς προϊόντα [gr]	Απώλεια μάζας [gr]	Συνολική επιφάνεια διάβρωσης [cm <sup>2</sup> ]	Απώλεια μάζας / Συνολική επιφάνεια διάβρωσης [gr/cm <sup>2</sup> ]*10 <sup>-3</sup>	Ημέρες έκθεσης
18	26.1034	26.0584	0.0452	11.79	3.834	20
19	26.9607	26.9043	0.0564	11.58	4.870	20
20	27.4860	27.4458	0.0402	12.22	3.290	20
21	27.5946	27.4185	0.1761	11.96	14.72	40
22	28.5311	28.3575	0.1736	12.27	14.15	40
23	27.6436	27.4541	0.1895	12.01	15.78	40
24	26.7589	26.5417	0.2172	11.99	18.12	60
25	27.4721	27.2616	0.2105	12.22	17.23	60
27	27.8323	27.5463	0.2860	12.24	23.37	60
28	28.6226	28.2963	0.3263	11.82	27.61	75
29	26.9248	26.5749	0.3499	12.11	28.89	75
30	27.2495	26.9027	0.3468	12.16	28.52	75

Πίνακας 9.4: Μετρήσεις μάζας δοκιμίων μικρών διαστάσεων με αστάρι πειράματος αλατονέφωσης

Για την κατανόηση της εξέλιξης του φαινομένου και του ρυθμού της απώλειας μάζας, είναι απαραίτητη η γραφική αναπαράσταση της απώλειας μάζας ως προς το χρόνο.



Διάγραμμα 9.5: Καμπύλη απώλειας μάζας προς χρόνο έκθεσης

Η διεργασία προσεγγίζεται μέσω της εξίσωσης:  $y = ax^b$

Όπου  $a = 0.1292$  και  $b = 1.2447$ . Η προσέγγιση είναι αποδεκτή αφού  $r^2 = 0.9674 < 1$ . Από το διάγραμμα αλλά και από τις τιμές του πίνακα μπορεί να παρατηρηθεί ότι το δοκίμιο 27 παρουσιάζεται να έχει πολύ μεγάλη απώλεια μάζας σε σχέση με τα δοκίμια 24 και 25 που αντιστοιχούν στον ίδιο χρόνο έκθεσης δηλαδή στις 60 ημέρες. Η απόκλιση αυτή μπορεί να θεωρηθεί αποδεκτή για τους λόγους που θα αναφερθούν στην ενότητα των συμπερασμάτων. Επίσης, παρατηρούμε ότι μεταξύ 20 – 40 ημέρες έκθεσης υπάρχει ένα «άλμα διάβρωσης» το οποίο επαναλαμβάνεται στο διάστημα 60 – 75, ενώ ενδιάμεσα η διάβρωση βρισκόταν σε σχετικά σταθερό ρυθμό εξάπλωσης. Συνεπώς, διαπιστώνουμε πως στο χρονικό διάστημα 40 – 60 υπάρχει σχετική γραμμικότητα στην εξέλιξη του φαινομένου διάβρωσης, ενώ στα διαστήματα 20 – 40 και 60 – 75, το φαινόμενο επιταχύνεται με εκθετικό ρυθμό.

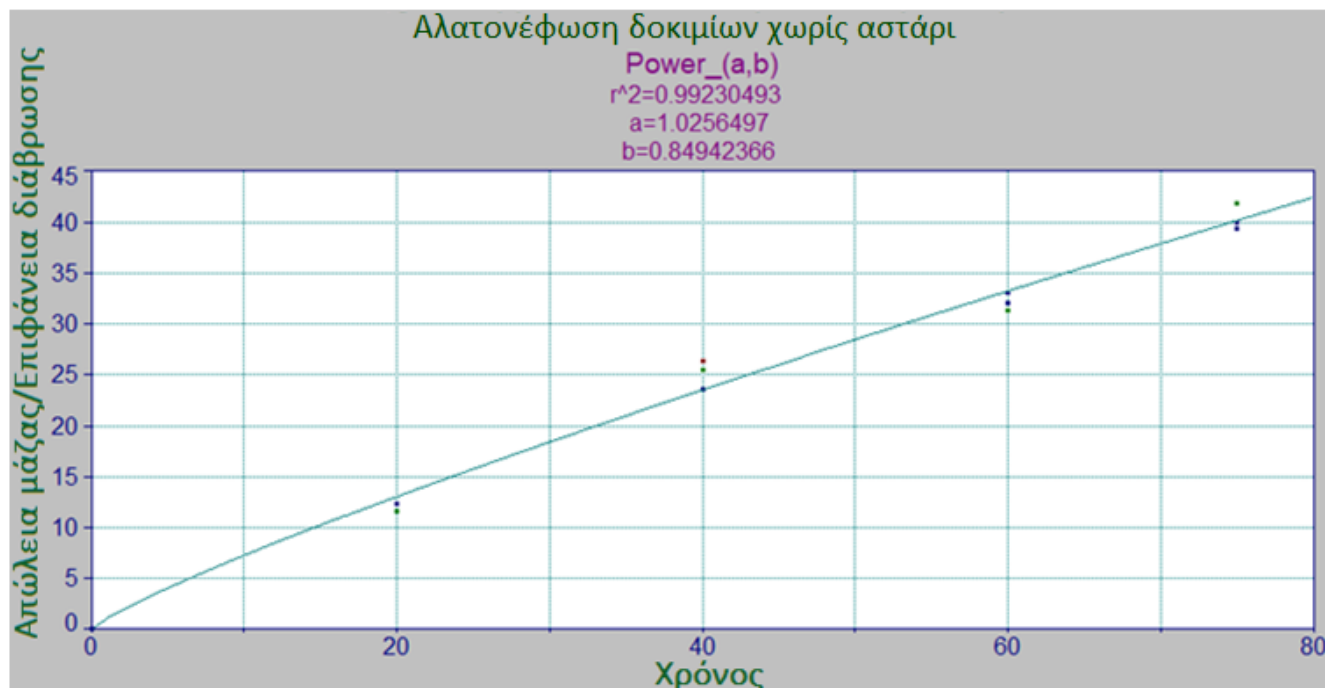
## 9.4 Διάβρωση δοκιμών μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι σε θάλαμο αλατονέφωσης

**Σημείωση:** Τα δοκίμια χωρίς αστάρι μονώθηκαν τόσο με ακρυλικό διάλυμα όσο και με κερί στις πλευρικές τους επιφάνειες, συνεπώς θεωρούμε πως το μοναδικό τμήμα των δοκιμών μικρών διαστάσεων που διαβρώθηκε βρίσκεται στις δύο απροστάτευτες από μονωτικό υλικό επιφάνειες. Για το λόγο αυτό, ως συνολική επιφάνεια διάβρωσης ορίζουμε το άθροισμα των απροστάτευτων επιφανειών των δοκιμών χωρίς αστάρι. Οι υπολογισμοί πραγματοποιήθηκαν με ηλεκτρονικό παχύμετρο και τα αποτελέσματα φαίνονται στον παρακάτω περιεκτικό πίνακα. Η απώλεια μάζας ως προς την επιφάνεια είναι εκφρασμένη σε  $(\text{gr}/\text{cm}^2) \cdot 10^{-3}$

Αριθμός δοκιμίου	Αρχική μάζα [gr]	Μάζα χωρίς προϊόντα [gr]	Απώλεια μάζας [gr]	Συνολική επιφάνεια διάβρωσης [cm <sup>2</sup> ]	Απώλεια μάζας / Συνολική επιφάνεια διάβρωσης [gr/cm <sup>2</sup> ]*10 <sup>-3</sup>	Ημέρες έκθεσης
18'	27.1026	26.9675	0.1351	11.66	11.59	20
19'	26.6165	26.4755	0.1410	11.40	12.37	20
20'	28.0976	27.9489	0.1487	12.07	12.32	20
21'	28.5995	28.2872	0.3123	11.81	26.44	40
22'	28.4740	28.1641	0.3099	12.13	25.55	40
23'	27.3489	27.0685	0.2804	11.87	23.62	40
24'	27.8632	27.4910	0.3722	11.86	31.38	60
25'	27.2707	26.8711	0.3996	12.08	33.08	60
27'	28.1798	27.7927	0.3871	12.08	32.04	60
28'	27.1024	26.6361	0.4663	11.67	39.96	75
29'	27.5078	27.0090	0.4988	11.93	41.81	75
30'	28.1221	27.6493	0.4728	12.02	39.33	75

Πίνακας 9.6: Μετρήσεις μάζας δοκιμών μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι πειράματος αλατονέφωσης

Για την κατανόηση της εξέλιξης του φαινομένου και του ρυθμού της απώλειας μάζας, είναι απαραίτητη η γραφική αναπαράσταση της απώλειας μάζας ως προς το χρόνο.



Διάγραμμα 9.7: Καμπύλη απώλειας μάζας προς χρόνο έκθεσης

Η διεργασία προσεγγίζεται μέσω της εξίσωσης:  $y = ax^b$

Όπου  $a = 1.0256$  και  $b = 0.8494$ . Η προσέγγιση είναι αποδεκτή αφού  $r^2 = 0.9885 < 1$ . Από το διάγραμμα αλλά και από τις τιμές του πίνακα μπορεί να παρατηρηθεί ότι μεταξύ 20 – 40 ημέρες έκθεσης υπάρχει ένα «άλμα διάβρωσης» συγκριτικά με το ρυθμό διάβρωσης που παρατηρείται στα υπόλοιπα χρονικά διαστήματα. Ο ρυθμός διάβρωσης σε αυτό το χρονικό διάστημα φαίνεται να είναι σχεδόν διπλάσιος από τον αντίστοιχο ρυθμό διάβρωσης που πραγματοποιείται στο διάστημα 0 – 20 ημέρες έκθεσης.

## 9.5 Παρατηρήσεις και συμπεράσματα διάβρωσης δοκιμίων μικρών διαστάσεων σε θάλαμο αλατονέφωσης

Στην ενότητα αυτή, παραθέτουμε διάφορα συμπεράσματα τα οποία προκύπτουν έπειτα από την παρατήρηση των ανωτέρω διαγραμμάτων, σχετικά με την έκθεση σε θάλαμο αλατονέφωσης δοκιμίων με αλλά και χωρίς αστάρι. Στη συνέχεια θα διατυπωθούν και ορισμένες παρατηρήσεις που προέκυψαν κατά τη διάρκεια εκτέλεσης της πειραματικής άσκησης και πιθανόν να μην είναι εμφανή από τα διαγράμματα που έχουν παρατεθεί.

Σχετικά με την αλατονέφωση δοκιμίων μικρών διαστάσεων με αστάρι:

- i. Από το διάγραμμα απώλειας μάζας – χρόνος έκθεσης συνεπάγεται το συμπέρασμα ότι η απώλεια μάζας των δοκιμίων χωρίς αστάρι πραγματοποιείται ανομοιόμορφα με συνεχείς διακυμάνσεις όσον αφορά το ρυθμό διάβρωσης.
- ii. Από το διάγραμμα, παρατηρούμε ότι ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμίων με αστάρι για χρονικό διάστημα έκθεσης 20 – 40 ημέρες παραμένει σχετικά σταθερός και μάλιστα λαμβάνει την υψηλότερη τιμή του. Πιο συγκεκριμένα, ο ρυθμός διάβρωσης στο διάστημα αυτό υπολογίζεται προσεγγιστικά ως ο λόγος της απώλειας μάζας στο διάστημα 20 – 40 μέρες προς το διάστημα αυτό. Έτσι έχουμε:

$$\text{Ρυθμός διάβρωσης} = \frac{0.18 - 0.05}{40 - 20} = 0.0065 \text{ gr/ημέρα}$$

- iii. Πιο συγκεκριμένα, για χρόνο έκθεσης 20 ημέρες, παρατηρείται μια σχετική ταύτιση των τιμών απώλειας μάζας μεταξύ των δοκιμίων με αστάρι τα οποία διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης και των αντίστοιχων δοκιμίων που διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης NaCl.
- iv. Στη συνέχεια, παρατηρούμε ότι στο διάστημα 50 – 65 ημέρες διάβρωσης, ο ρυθμός διάβρωσης σταδιακά μειώνεται.
- v. Μετά από τις 65 μέρες διάβρωσης, παρατηρούμε από το διάγραμμα μια απότομη αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Δηλαδή, η διάβρωση συνεχίζει να προκαλεί απώλεια μάζας στα εκτιθέμενα δοκίμια αλλά με πιο υψηλό ρυθμό. Συνεπώς, για δεδομένη απώλεια μάζας, θα απαιτούνταν λιγότερες μέρες έκθεσης στο θάλαμο αλατονέφωσης προκειμένου να επιτευχθεί η αναμενόμενη διάβρωση.
- vi. Ένα γενικό συμπέρασμα που μπορεί να εξαχθεί μέχρι στιγμής είναι το γεγονός ότι ο ρυθμός απώλειας μάζας μέσω της μεθόδου διάβρωσης με αλατονέφωση είναι αισθητά μεγαλύτερος από τον αντίστοιχο στο λουτρό εμβάπτισης. Δηλαδή, οι συνθήκες διάβρωσης στο θάλαμο αλατονέφωσης θεωρούνται πιο «επιθετικές»,

πράγμα που μπορούμε να διαπιστώσουμε και από το οπτικό αποτέλεσμα της οξείδωσης μεταξύ των 2 μεθόδων.

- vii. Πρακτικά, το μεγαλύτερο ποσοστό διάβρωσης των δοκιμίων με αστάρι στο θάλαμο αλατονέφωσης, πραγματοποιείται στις 40 και 75 ημέρες έκθεσης όπως φαίνεται τόσο από το διάγραμμα 9.5 αλλά και τον πίνακα 9.4 των μετρήσεων.
- viii. Παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι για χρόνο έκθεσης 60 ημέρες, η διασπορά των τιμών απώλειας μάζας είναι αισθητά μεγαλύτερη από την αντίστοιχη στις χρονικές στιγμές 20, 40 και 75. Στις 60 ημέρες έκθεσης, η διαφορά της χαμηλότερης τιμής απώλειας μάζας σε σχέση με την αντίστοιχη υψηλότερη τιμή και η εύρεση σε ποσοστιαία απόκλιση προκύπτει από την εξής σχέση:

$$\sigma = \frac{23.37-17.23}{23.37} * 100\% = 26.3 \%$$

Άρα, η μεταβλητότητα των τιμών στην περιοχή αυτή είναι:  $\sigma^2 = 6.92\%$ . Η τιμή αυτή είναι αποδεκτή καθώς δεν ξεπερνά την τιμή του 15% που έχουμε θέσει ως οριακή τιμή αποδοχής των πειραματικών αποτελεσμάτων ( $r^2 > 0.85$ ). Προφανώς, αφού αυτή η πειραματική τιμή είναι αποδεκτή, το ίδιο θα ισχύει και για τις πειραματικές τιμές σε οποιαδήποτε άλλη χρονική στιγμή, αφού οι αντίστοιχες διασπορές είναι αρκετά μικρότερες.

Η διασπορά των τιμών στην περιοχή αυτή για τα δοκίμια με αστάρι μπορεί να οφείλεται σε κάποιον από τους κατωτέρω λόγους.

- ix. Σφάλματα μέτρησης λόγω κατασκευαστικής αστοχίας της μετρητικής διάταξης, ή ακόμα και λόγω λανθασμένης αντιστάθμισης βάρους έπειτα από κάποια μέτρηση.
- x. Πιθανότητα εμφάνισης αυξημένης διάβρωσης λόγω ανεπιθύμητης επαφής μεταξύ των δοκιμίων και της «εξέδρας» θερμοπλαστικού πολυμερούς που τοποθετήθηκαν τα δοκίμια στον πυθμένα του θαλάμου. Επίσης, όσο πιο κοντά τοποθετημένα είναι τα δοκίμια τα οποία εκτίθενται σε διαβρωτικό περιβάλλον, τόσο ελλοχεύει ο κίνδυνος ανάπτυξης ανεπιθύμητων τάσεων μεταξύ των ενεργών επιφανειών διάβρωσης μεταξύ τους, γεγονός που συμβάλλει στην αύξηση του ρυθμού διάβρωσης. Επίσης, λόγω του ότι ο θάλαμος αλατονέφωσης έπρεπε να ανοίγει σχετικά συχνά, οι συνθήκες διάβρωσης ανανεώνονταν με αποτέλεσμα να υπεισέρχονται και διάφοροι παράγοντες τυχαιότητας όσον αφορά τις πειραματικές μετρήσεις στη συνέχεια, καθώς το πείραμα που εξετάζουμε αναφέρεται σε σταθερές συνθήκες (θερμοκρασίας και περιεκτικότητας διαλύματος NaCl).
- xi. Τέλος, τυχόν οξείδια και προϊόντα διάβρωσης τα οποία επικάθισαν στις επιφάνειες των δοκιμίων και δεν αφαιρέθηκαν στο στάδιο του καθαρισμού και της απομάκρυνσης της υγρασίας, πιθανόν να εισήγαγαν σφάλματα μέτρησης, τα οποία δεν εισήλθαν σε όλες τις μετρήσεις παρά μόνο σε συγκεκριμένες, με αποτέλεσμα τη δημιουργία διασποράς των τιμών σε συγκεκριμένη χρονική στιγμή.

Σχετικά με την αλατονέφωση δοκιμών μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι:

- i. Από το διάγραμμα απώλειας μάζας/επιφάνεια διάβρωσης – χρόνος έκθεσης εξάγεται το συμπέρασμα ότι η απώλεια μάζας των δοκιμών χωρίς αστάρι πραγματοποιείται σχετικά ομοιόμορφα όσον αφορά το ρυθμό διάβρωσης και την εξέλιξη της πορείας της διάβρωσης. Αυτό πρακτικά φαίνεται από το διάγραμμα 9.7 όπου η καμπύλη είναι σχεδόν γραμμική καθώς η τιμή του εκθέτη  $b$  είναι κοντά στη μονάδα και συγκεκριμένα είναι  $b = 0.8494$ .
- ii. Σχετικά με την εξέλιξη του φαινομένου διάβρωσης των δοκιμών χωρίς αστάρι, μπορούμε να αποφανθούμε ότι ο ρυθμός διάβρωσης επιταχύνεται μεταξύ του χρόνου έκθεσης 20 – 40 ημέρες. Παρατηρούμε μάλιστα πως ο ρυθμός διάβρωσης σχεδόν διπλασιάζεται στο διάστημα αυτό σε σχέση με κάθε άλλο διάστημα διάβρωσης.
- iii. Από τον πίνακα 9.6 , μπορούμε να υπολογίσουμε το μέσο όρο των απωλειών μάζας/επιφάνεια διάβρωσης για κάθε χρονική περίοδο διάβρωσης. Έτσι, μετά από 20 μέρες διάβρωσης, η απώλεια μάζας/επιφάνεια διάβρωσης ανέρχεται στα  $12.09 \text{ [gr/cm}^2\text{]}\cdot 10^{-3}$  , στις 40 μέρες διάβρωσης στα  $25.20 \text{ [gr/cm}^2\text{]}\cdot 10^{-3}$ , στις 60 μέρες στα  $32.17 \text{ [gr/cm}^2\text{]}\cdot 10^{-3}$  ενώ στις 75 μέρες στα  $40.37 \text{ [gr/cm}^2\text{]}\cdot 10^{-3}$  . Συνεπώς, γίνεται κατανοητό ότι ο μέγιστος ρυθμός διάβρωσης εμφανίζεται στο χρονικό διάστημα μεταξύ 20 – 40 ημέρες διάβρωσης και υπολογίζεται:

$$(\text{Ρυθμός διάβρωσης})_{\max} = \frac{25.20 - 12.09}{40 - 20} = 0.6555 \text{ [gr/cm}^2\text{]}\cdot 10^{-3} / \text{ημέρα}$$

- iv. Υπολογίσαμε στην περίπτωση των δοκιμών χωρίς αστάρι για διάβρωση σε λουτρό εμβάπτισης NaCl στην ενότητα 8.5, ότι ο μέγιστος ρυθμός διάβρωσης ανέρχεται στα  $0.2215 \text{ [gr/cm}^2\text{]}\cdot 10^{-3} / \text{ημέρα}$ . Συμπεραίνουμε λοιπόν, πως ο μέγιστος ρυθμός διάβρωσης στη μέθοδο της αλατονέφωσης είναι σχεδόν τριπλάσιος από το μέγιστο ρυθμό διάβρωσης σε λουτρό εμβάπτισης NaCl. Το συμπέρασμα αυτό είναι απολύτως φυσιολογικό καθώς επιβεβαιώνει την αρχική μας εκτίμηση από τα οπτικά αποτελέσματα της διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης πως πρόκειται για πιο «επιθετική» διαδικασία διάβρωσης σε σχέση με την εμβάπτιση σε λουτρό NaCl.
- v. Μετά από τις 75 μέρες διάβρωσης, παρατηρούμε από το διάγραμμα ότι ο ρυθμός διάβρωσης των δοκιμών χωρίς αστάρι στο θάλαμο αλατονέφωσης συνεχίζει να αυξάνεται γραμμικά, γεγονός που αποδεικνύει την ομαλότητα με την οποία εξελίσσεται το φαινόμενο της διάβρωσης μετά το αρχικό «άλμα διάβρωσης» που πραγματοποιήθηκε στο διάστημα 20 – 40 ημέρες έκθεσης.
- vi. Παρατηρούμε τόσο από το διάγραμμα 9.7 όσο και από τον πίνακα μετρήσεων 9.6 ότι δεν υπάρχει μεγάλη διασπορά τιμών όσον αφορά τη διάβρωση των δοκιμών σε κάθε χρονικό διάστημα έκθεσης. Στην περίπτωση των δοκιμών χωρίς αστάρι που διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης NaCl, η διασπορά των τιμών ήταν εμφανώς μεγαλύτερη, ωστόσο οι τιμές αυτές κρίθηκαν αποδεκτές όσον αφορά τη μεταβλητότητά τους. Από όσα αναφέρθηκαν μπορούμε να εξάγουμε το συμπέρασμα ότι οι τυπικές αποκλίσεις των τιμών απώλειας μάζας/επιφάνεια διάβρωσης είναι εντός φυσιολογικών ορίων και δεν κρίνεται σκόπιμη η περαιτέρω αριθμητική διερεύνησή τους.



Παρ'όλα αυτά, για λόγους πληρότητας υπενθυμίζουμε τους λόγους για τους οποίους εμφανίζεται διασπορά των τιμών των πειραματικών καμπυλών στην περίπτωση της διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης και είναι:

- vii. Κατασκευαστικά σφάλματα μέτρησης της μετρητικής διάταξης, ή ακόμα και λόγω λανθασμένης αντιστάθμισης βάρους έπειτα από κάποια μέτρηση.
- viii. Πιθανότητα εμφάνισης αυξημένης διάβρωσης λόγω των μικρών αποστάσεων μεταξύ των δοκιμίων, όπως αυτά τοποθετήθηκαν πάνω στις αυτοσχέδιες «εξέδρες» από θερμοπλαστικό υλικό. Λόγω της εξέλιξης του φαινομένου διάβρωσης, είναι πολύ πιθανό να αναπτύχθηκαν ανεπιθύμητες τάσεις (διαφορά δυναμικού) μεταξύ των ενεργών επιφανειών των δοκιμίων γεγονός που οδήγησε σε αυξημένο ρυθμό διάβρωσης σε σχέση με τον αναμενόμενο.
- ix. Πιθανότητα εμφάνισης αυξημένης διάβρωσης λόγω επαφής των μεταλλικών επιφανειών των δοκιμίων με την επιφάνεια θερμοπλαστικού υλικού που τοποθετήθηκε για τη συγκράτηση των δοκιμίων μικρών διαστάσεων στον πυθμένα του θαλάμου αλατονέφωσης.
- x. Σφάλματα μέτρησης λόγω επικάλυψης τριμμάτων κεριού στην επιφάνεια των δοκιμίων και κάλυψής τους με προϊόντα οξείδωσης, είναι πολύ πιθανό να οδήγησαν σε αυξημένες τιμές μάζας κατά τη ζύγιση των δοκιμίων χωρίς αστάρι. Η πιθανότητα να συνέβη κάτι τέτοιο είναι πολύ μικρή δεδομένου ότι πραγματοποιήθηκε χημικός καθαρισμός, ωστόσο δεν μπορούμε να την αποκλείσουμε τελείως.
- xi. Τέλος, τυχόν οξείδια και προϊόντα διάβρωσης τα οποία εισήλθαν στο πορώδες τμήμα των απροστάτευτων επιφανειών των δοκιμίων χωρίς αστάρι και δεν απομακρύνθηκαν κατά το στάδιο του στεγνώματος, μπορεί να οδήγησαν σε μειωμένες τιμές απώλειας μάζας κατά τη ζύγιση.

**Σημείωση:** Λόγω της υψηλής τραχύτητας των επιφανειών των δοκιμίων μετά το πέρας του χρονικού διαστήματος διάβρωσης σε κάθε περίπτωση, δεν κρίνεται σκόπιμη η παρουσίαση διαγραμμάτων μεταβολής πάχους – χρόνος έκθεσης. Λόγω της εμφάνισης μεγάλης ανομοιογένειας στις επιφάνειες των δοκιμίων, οι μετρήσεις πάχους με χρήση ηλεκτρονικού παχυμέτρου κρίθηκαν ιδιαίτερα δύσκολες, ενώ τα πειραματικά αποτελέσματα παρουσιάζουν σημαντικά σφάλματα μέτρησης. Έτσι οι καμπύλες σε άλλα σημεία παρουσιάζουν μεγάλες διακυμάνσεις, ενώ σε άλλα σημεία είναι σταθερές, αδυνατώντας να μας δώσουν χρήσιμα πειραματικά δεδομένα. Για το λόγο αυτό, στο Παράρτημα της παρούσας διπλωματικής εργασίας, παρουσιάζονται οι αντίστοιχοι πίνακες με τις μετρήσεις πάχους δοκιμίων τόσο μετά τη διάβρωση από εμβάπτιση, όσο και από τη διάβρωση με αλατονέφωση. Οι τελικές τιμές του πάχους των δοκιμίων μικρών διαστάσεων προέκυψαν από τη μέτρηση τεσσάρων σημείων σε τέσσερις διαφορετικές περιοχές των παράπλευρων επιφανειών και την εύρεση των μέσων τιμών τους.

Τέλος, παρουσιάζονται πίνακες στους οποίους έχουμε υπολογίσει την αρχική διατομή των αρχικά απαραμόρφωτων δοκιμίων μετά το πέρας του χρόνου έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον τόσο σε θάλαμο αλατονέφωσης όσο και σε λουτρό εμβάπτισης καθώς και τις τελικές διατομές στην περιοχή του «λαιμού». Μέσω αυτών των πινάκων, μπορούμε να βγάλουμε χρήσιμα συμπεράσματα σχετικά με τη δράση του μηχανισμού της διάβρωσης καθώς και το είδος της θραύσης το οποίο πραγματοποιείται. Συνεπώς, πριν την έναρξη της μηχανικής καταπόνησης, σε κάθε περίπτωση, η διατομή του λαιμού των δοκιμίων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη συγκριτικά με τη διατομή στην περιοχή της θραύσης, καθώς λόγω της

πλαστικής παραμόρφωσης της περιοχής και του elongation που παρατηρείται, έχουμε μείωση της τελικής διατομής.

Επιπλέον, αξίζει να τονιστεί πως τα δοκίμια εκείνα τα οποία αντιστοιχούν σε ένα συγκεκριμένο μηχανισμό διάβρωσης (δηλαδή εμβάπτιση ή αλατονέφωση) για μεγαλύτερο διάστημα έκθεσης σε διαβρωτικές συνθήκες, η διατομή του λαιμού στο σημείο της θραύσης θα πρέπει να είναι μεγαλύτερη. Το τελευταίο προκύπτει από το γργονός πως όσο αυξάνεται η ο χρόνος έκθεσης τόσο αυξάνεται η ψαθυρότητα των δοκιμίων και συνεπώς μειώνεται η περιοχή πλαστικής παραμόρφωσης και το elongation.

## 9.6 Διάταξη πειράματος αλατονέφωσης δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε και στην περίπτωση διεξαγωγής του πειράματος αλατονέφωσης των δοκιμίων μικρών διαστάσεων, έτσι και για την υλοποίηση του πειράματος αλατονέφωσης των χαλύβδινων δοκιμίων χρησιμοποιήθηκαν αυτοσχέδιες διατάξεις. Πιο συγκεκριμένα, για τη συνεχή έκθεση των δοκιμίων σε διαβρωτικό περιβάλλον, αποφασίστηκε η χρήση ανοξεϊδωτων λεπτών δοκών, καθώς και πλαστικού σπάγκου. Έτσι, με κατάλληλη περιτύλιξη του σπάγκου τόσο στις δοκούς όσο και στα δοκίμια καταφέραμε να κρεμάσουμε τα δοκίμια πάνω στις μεταλλικές δοκούς. Ιδιαίτερη προσοχή έπρεπε να επιδείξουμε κατά την περιτύλιξη του σπάγκου γύρω από τα χαλύβδινα δοκίμια τα οποία διέθεταν μόνωση, ώστε να μην καταστρέψουμε τη μόνωση στο σημείο αυτό. Ειδικά, υψηλότερος κίνδυνος να καταστραφεί η μόνωση ήταν στην περιοχή του λαιμού όπου συνηθίζεται να γίνεται η πρόσδεση του σπάγκου, δηλαδή γύρω από το κέντρο βάρους των δοκιμίων. Τελικά, οι μεταλλικές δοκοί προσαρμόστηκαν σε κατάλληλες εσοχές που βρίσκονταν εντός του θαλάμου αλατονέφωσης.

Με τον τρόπο αυτό επιτυγχάνουμε τα δοκίμια να μην βρίσκονται σε επαφή ούτε μεταξύ τους, αλλά ούτε και με τη μεταλλική δοκό. Συνεπώς ο ρυθμός διάβρωσης παρέμενε σχετικά σταθερός και δεν επηρεαζόταν από εξωγενείς και ανεπιθύμητους παράγοντες, όπως αναπόφευκτα συνέβαινε στη διάβρωση στο λουτρό εμβάπτισης. Οι αποστάσεις μεταξύ των «αιωρούμενων» δοκιμίων εντός του θαλάμου κρίθηκαν ασφαλείς για τη διεξαγωγή του πειράματος, ενώ συγχρόνως στη διάβρωση με αλατονέφωση δεν αντιμετωπίσαμε κάποιο πρόβλημα όσον αφορά την ταυτόχρονη έκθεση των δοκιμίων με και χωρίς αστάρι εντός του ίδιου διαβρωτικού περιβάλλοντος, καθώς η διάβρωση επιτυγχάνεται κατά κύριο λόγο μέσω των παραγόμενων ατμών NaCl και όχι από κάποιο λουτρό εμβάπτισης. Αξίζει να τονιστεί επίσης πως η θερμοκρασία εντός του θαλάμου αλατονέφωσης διατηρήθηκε σε σχετικά σταθερά επίπεδα, όπως επίσης και το διάλυμα χλωριούχου νατρίου είχε σχετικά σταθερή περιεκτικότητα ενώ πραγματοποιούνταν και συχνές ανανεώσεις του διαλύματος μέσω προσθήκης NaCl. Στη συνέχεια, παρατίθεται για λόγους κατανόησης της πειραματικής διάταξης μια εικόνα με τη γενική διάταξη στο εσωτερικό του θαλάμου αλατονέφωσης κατά την έκθεση των δοκιμίων σε διαβρωτικές συνθήκες.



Εικόνα 9.8: Γενική διάταξη εσωτερικού πυθμένα θαλάμου αλατονέφωσης. Στο μπροστά μέρος διακρίνεται η διάταξη των δοκιμίων και στο πίσω των δοκιμίων μικρότερων διαστάσεων.

## 9.7 Εκτέλεση πειράματος αλατονέφωσης δοκιμίων

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 9.2 σχετικά με την εκτέλεση του πειράματος αλατονέφωσης των δοκιμίων μικρών διαστάσεων με και χωρίς αστάρι, η ίδια διαδικασία ακολουθήθηκε και στην περίπτωση της διάβρωσης των δοκιμίων στο θάλαμο αλατονέφωσης.

Να σημειωθεί πως τα δοκίμια με αστάρι εισήλθαν στο θάλαμο αλατονέφωσης χωρίς κάποια περαιτέρω μόνωση, ενώ τα δοκίμια χωρίς αστάρι μονώθηκαν στις περιφερειακές τους επιφάνειες τόσο με ακρυλικό διάλυμα, όσο και με κερί. Τα χρονικά διαστήματα έκθεσης των χαλύβδινων δοκιμίων στην αλατονέφωση ήταν δύο, σε αντίθεση με την αλατονέφωση των δοκιμίων μικρών διαστάσεων που πραγματοποιήθηκε σε τέσσερα στάδια. Παρ'όλα αυτά, αυτά τα χρονικά διαστήματα είχαν μεγαλύτερο χρονικό βήμα και επιλέχθηκαν για πειραματικούς σκοπούς ως εξής:

1. 0 – 30 ημέρες έκθεσης
2. 30 – 60 ημέρες έκθεσης

Μετά το πέρας κάθε απαιτούμενου χρονικού διαστήματος έκθεσης στο θάλαμο αλατονέφωσης, τα δοκίμια απομακρύνονταν από το δοχείο, καθαρίζονταν με νερό όσμωσης και ειδικούς σπόγγους ώστε να απομακρυνθούν τα επιφανειακά οξείδια και προϊόντα διάβρωσης τα οποία επικάθονταν στην επιφάνειά τους. Στη συνέχεια, τα δοκίμια τοποθετούνταν σε κατάλληλα διαμορφωμένο χώρο στεγνώματος για κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα, με σκοπό την απομάκρυνση της υγρασίας και διαφόρων εγκλεισμάτων στην πορώδη επιφάνειά τους. Να σημειωθεί ότι στην περίπτωση των δοκιμίων δεν εφαρμόστηκε χημικός καθαρισμός σε διάλυμα υδροχλωρικού οξέος, αφού βασικός σκοπός της συγκεκριμένης πειραματικής διαδικασίας ήταν η μελέτη της μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων (όριο διαρροής  $\sigma_y$  και μέγιστη εφελκυστική αντοχή  $\sigma_{UTS}$ ) λόγω της έκθεσης των δοκιμίων σε διαβρωτικό περιβάλλον με αποτέλεσμα την απώλεια μάζας και τη μείωση της αρχικής τους διατομής σε κάθε περίπτωση πριν την έναρξη του πειράματος εφελκυσμού. Η

μόνωση σε κάθε περίπτωση έπρεπε να αφαιρεθεί πριν τη δοκιμή εφελκυσμού, ώστε να επιτευχθεί σταθερή συγκράτηση από την αρπάγη. Σε περίπτωση μη αφαίρεσης της περιφερειακής μόνωσης, εγκυμονούσε ο κίνδυνος ολίσθησης του δοκιμίου στην αρπάγη, γεγονός που θα εισήγαγε μεγάλα σφάλματα στη μελέτη των μηχανικών τους ιδιοτήτων.

Τα δοκίμια, μετά το στέγνωμα, συλλέγονταν και αριθμούνταν κατάλληλα ώστε στη συνέχεια να μεταφερθούν στο μηχανουργείο της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών με σκοπό τη θραύση με επιβολή εφελκυστικού φορτίου.

## 9.8 Μελέτη μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων με αστάρι λόγω διάβρωσης στο θάλαμο αλατονέφωσης

Στη συνέχεια παρατίθεται ο συνοπτικός πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων 9.9 όπου παρουσιάζονται ο αριθμός του δοκιμίου, η μέθοδος διάβρωσης, ο χρόνος έκθεσης καθώς και οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων που αναφέρονται, με σκοπό την ενδελεχή εξέταση της μεταβολής τους έπειτα από τη διάβρωση την οποία υπέστησαν στο θάλαμο αλατονέφωσης. Στην προκειμένη ενότητα, παραθέτουμε αναλυτικά το μηχανισμό διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης για δοκίμια με αστάρι.

Κατ'απόλυτη συμφωνία με όσα αναφέρθηκαν στην ενότητα 8.8, εκτός από το συνοπτικό πίνακα μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων, θα ακολουθήσει παρουσίαση καμπυλών του επιβαλλόμενου φορτίου συναρτήσει της επιμήκυνσης των δοκιμίων καθώς και καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης, οι οποίες διαμορφώθηκαν με επεξεργασία των πρώτων σε λογιστικό φύλλο excel. Στη συνέχεια, με κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και χρήση του λογισμικού TableCurve και Excel, θα παρατεθούν οι προκύπτουσες καμπύλες μεταβολής των **μέσων τιμών ορίων διαρροής  $\sigma_y$ , των μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων  $\sigma_{UTS}$  καθώς και των μέσων τάσεων θραύσεως των δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου έκθεσης**.

Για λόγους οικονομίας, αναφέρεται συνοπτικά πως το θεωρητικό υπόβαθρο το οποίο θα ακολουθηθεί για την ανάλυση των πειραματικών δεδομένων έχει ήδη αναλυθεί και εξεξηγηθεί στην ενότητα 8.8, σχετικά με το μηχανισμό που ακολουθείται προκειμένου να προκύψουν οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης για τα διαβρωμένα δοκίμια. Προφανώς, τα πειραματικά αποτελέσματα θα σχολιαστούν και τα αποτελέσματα που θα προκύψουν θα μας δώσουν χρήσιμες πληροφορίες για τη λειτουργία των μηχανισμών διάβρωσης και την επίδρασή τους στις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων χάλυβα.

Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε και στην προκειμένη περίπτωση είναι το λογιστικό φύλλο του excel, το οποίο χρησιμοποιήθηκε προκειμένου να μετατρέψουμε τα πειραματικά αποτελέσματα των μετρήσεων εφελκυστικής δύναμης-επιμήκυνσης στα αντίστοιχα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης. Αξίζει να τονιστεί, πως για κάθε δοκίμιο, ανάλογα το χρόνο έκθεσης σε διαβρωτικές συνθήκες έπρεπε να υπολογιστεί σε πρώτη φάση η διατομή μετά το διάστημα έκθεσης σε διάβρωση και πριν την έναρξη της εφελκυστικής καταπόνησης ώστε να «διορθώσουμε» τις τιμές των τάσεων που είχαν προκύψει για μια αρχικά σταθερή διατομή που είχε επιλεχθεί από το λογισμικό της μηχανής εφελκυσμού. Η μεταβολή της διατομής των δοκιμίων είναι απολύτως λογική και οφείλεται στην απώλεια μάζας λόγω του φαινομένου διάβρωσης.

Ακολουθεί ο συνοπτικός πίνακας μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων με αστάρι τα οποία διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης.

ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΑΣΤΑΡΙ								
Αριθμός δοκιμίου	Μέθοδος διάβρωσης	Χρόνος έκθεσης [Ημέρες]	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	Τάση θραύσης $\sigma_B$ [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]
2	Χωρίς διάβρωση	0	386.41	25.30	560.76	1050.72	48.76	119.63
3	Χωρίς διάβρωση	0	403.39	25.37	570.18	1039.84	51.95	114.47
4	Χωρίς διάβρωση	0	409.63	25.12	578.43	1028.36	50.33	108.87
7	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	30	383.62	24.98	560.68	993.94	44.64	105.86
8	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	30	394.05	24.88	574.30	887.66	54.51	115.85
21	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	30	393.08	24.27	562.29	906.08	58.47	122.58
31	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	60	387.72	25.26	570.10	900.20	52.81	118.78
32	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	60	386.53	24.69	568.66	871.95	51.66	119.27
33	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	60	378.62	24.00	545.38	925.65	48.56	114.59

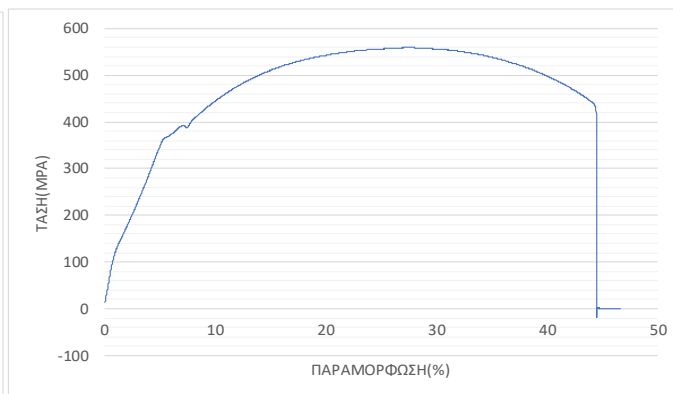
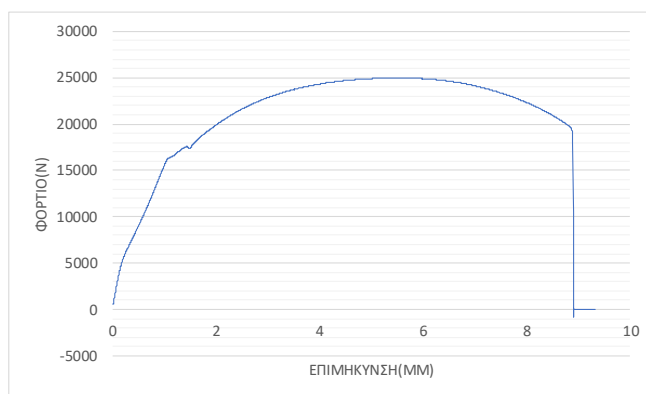
Πίνακας 9.9: Συνοπτικός πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων για δοκίμια με αστάρι διαβρωμένα σε θάλαμο αλατονέφωσης.

Για λόγους πληρότητας, σε κάθε συνοπτικό πίνακα μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων, θα παραθέτουμε και τα δοκίμια 2,3,4 τα οποία είναι εντελώς αδιάβρωτα και δεν έχουν ψηγματοβοληθεί (blank δοκίμια).

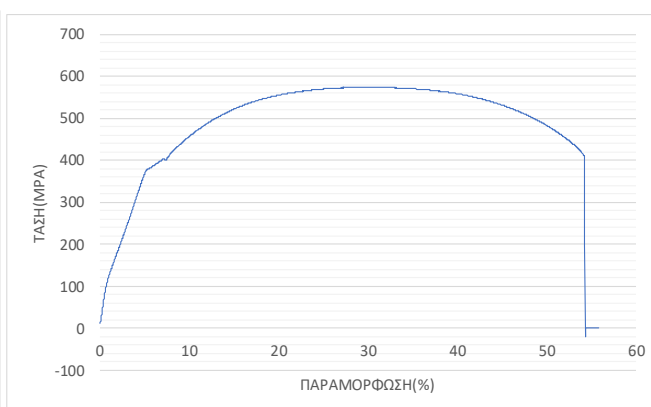
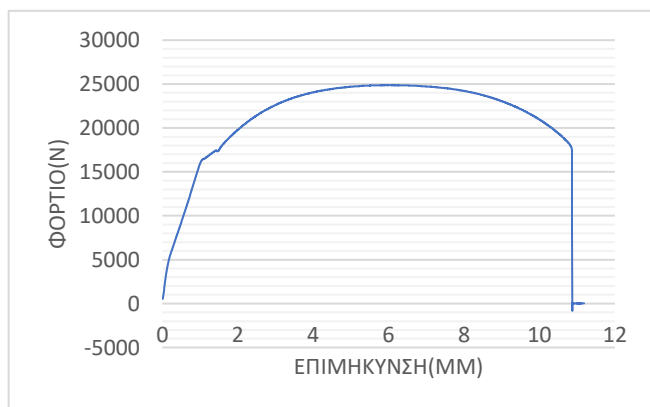
Στη συνέχεια, παραθέτουμε τις καμπύλες μεταβολής της επιβαλλόμενης δύναμης συναρτήσει της επιμήκυνσης των δοκιμίων, καθώς και τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης, βάσει των οποίων προέκυψαν οι 3 βασικές μηχανικές ιδιότητες που αναφέρθηκαν ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_{UTS}$ ,  $\sigma_B$ ) καθώς και η % παραμόρφωση των δοκιμίων μέχρι την αστοχία αλλά και η ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση (J).

Τα δοκίμια στα οποία θα αναφέρονται οι παρακάτω καμπύλες είναι αυτά που παρουσιάστηκαν στο συνοπτικό πίνακα 9.9, εκείνα δηλαδή τα οποία διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης και δεν έχουν ψηγματοβοληθεί (δοκίμια με αστάρι).

Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
7	383.62	24.98	560.68	44.64	105.86	993.94

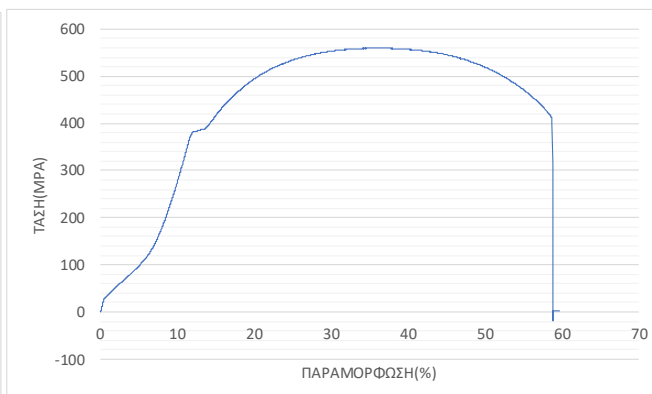
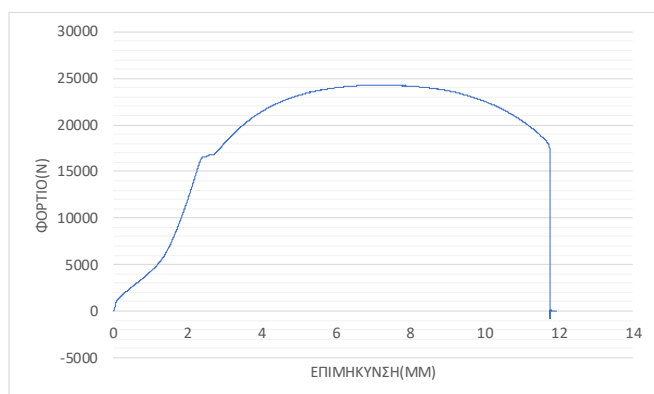


Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
8	394.05	24.88	574.30	54.51	115.85	887.66

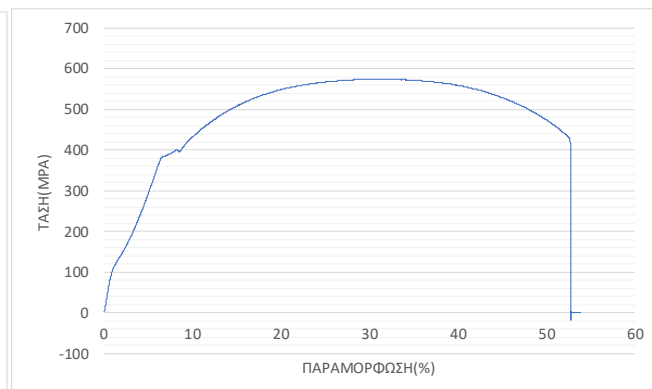
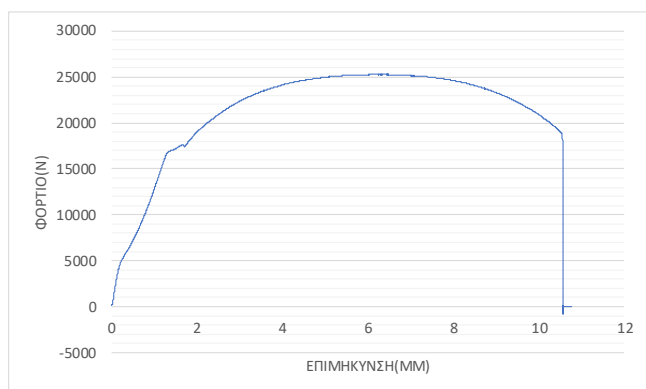




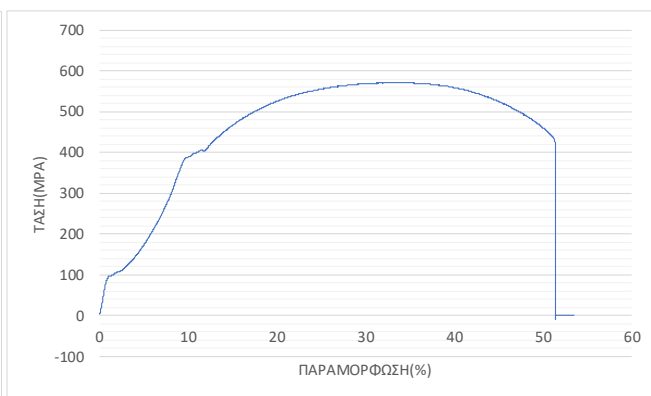
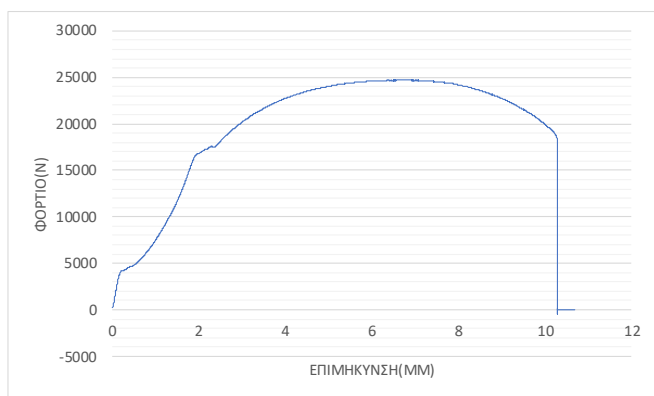
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
21	393.08	24.27	562.29	58.47	122.58	906.08



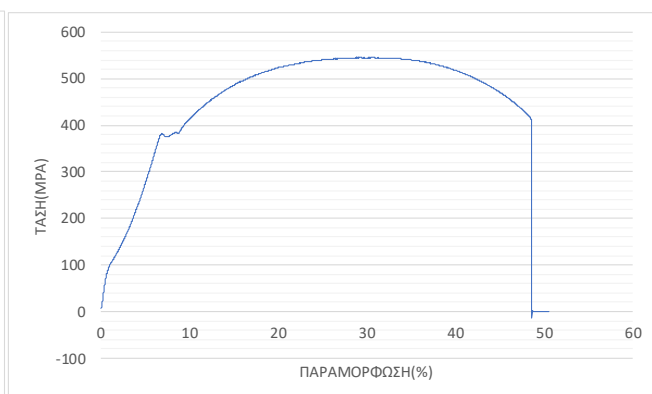
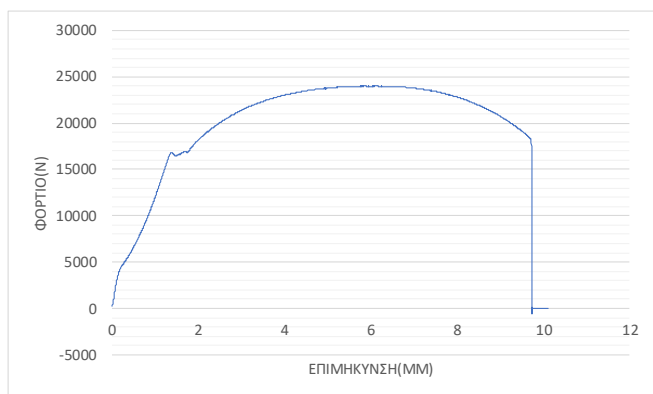
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
31	387.72	25.26	570.10	52.81	118.78	900.20



Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
32	386.53	24.69	568.66	51.66	119.27	871.95



Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
33	378.62	24.00	545.38	48.56	114.59	925.65



## 9.9 Αναλυτική παρουσίαση μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων με αστάρι λόγω διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης με χρήση λογισμικού TableCurve-Excel

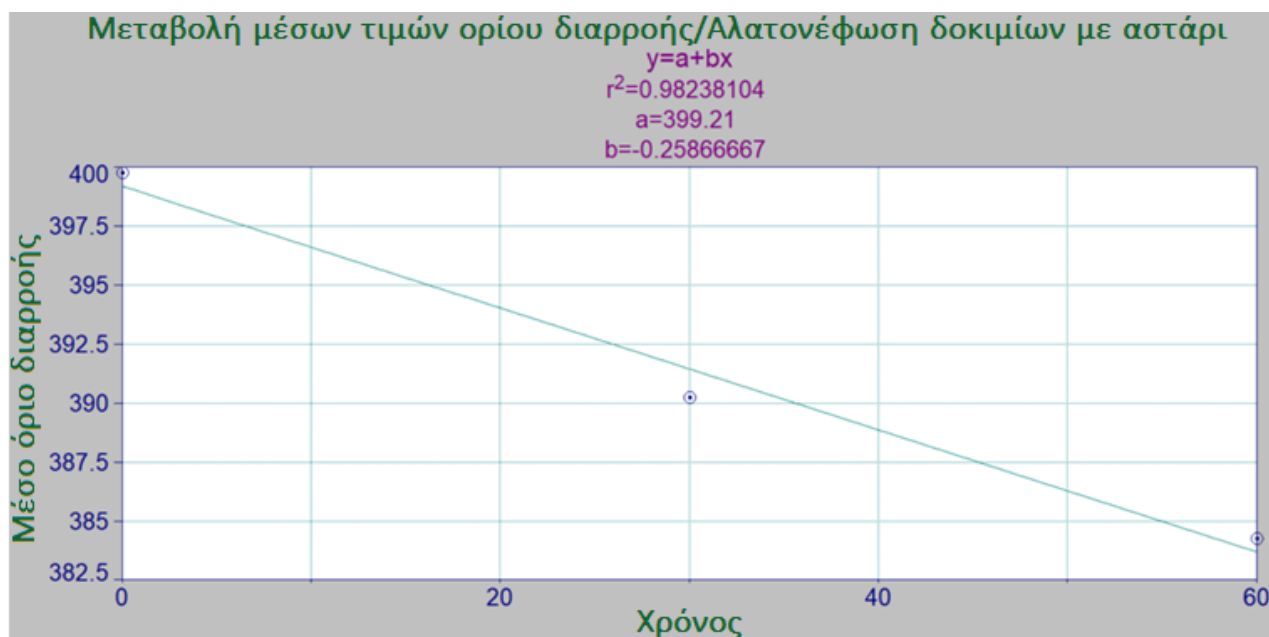
ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΑΣΤΑΡΙ					
Αριθμός δοκιμίων	Μέθοδος διάβρωσης	Χρόνος έκθεσης [Ημέρες]	Μέση τιμή ορίου διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέση τιμή μέγιστης εφελκυστικής τάσης ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	Μέση τάση θραύσης $\sigma_B$ [MPa]
2,3,4	Χωρίς διάβρωση	0	<b>399.81</b>	<b>569.79</b>	<b>1039.64</b>
7,8,21	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	30	<b>390.25</b>	<b>565.76</b>	<b>929.23</b>
31,32,33	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	60	<b>384.29</b>	<b>561.38</b>	<b>899.27</b>

Πίνακας 9.10: Συνοπτικός πίνακας μέσων τιμών μηχανικών ιδιοτήτων για δοκίμια με αστάρι διαβρωμένα σε θάλαμο αλατονέφωσης.

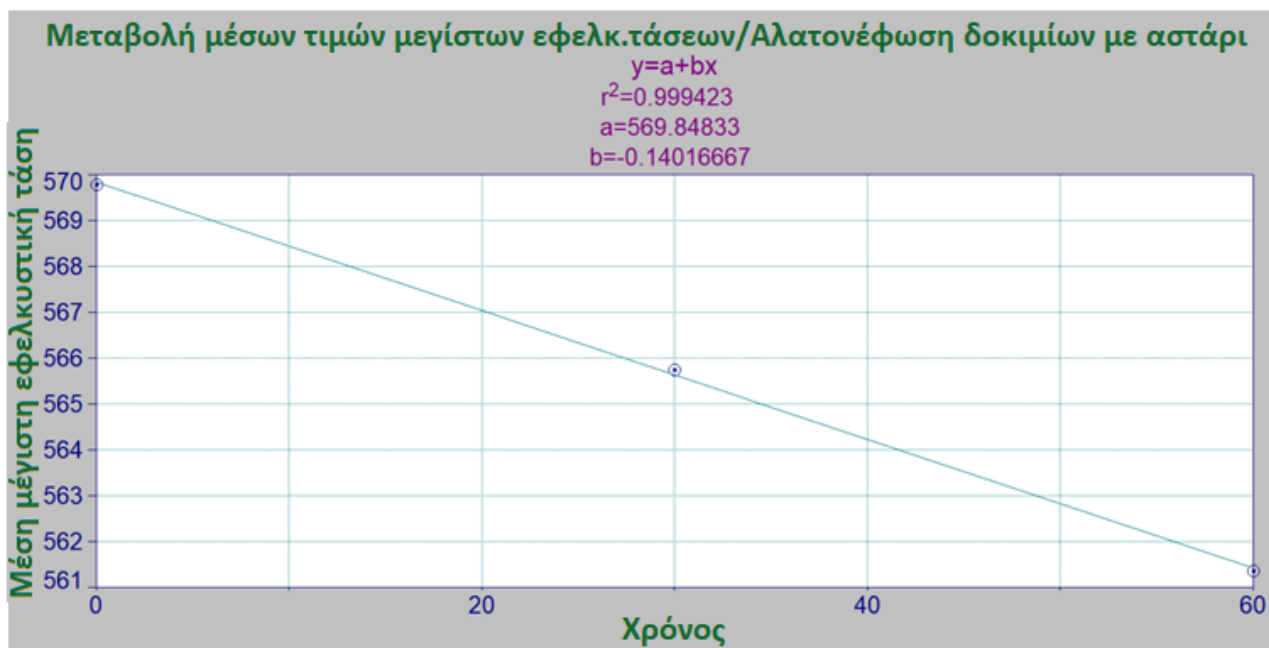
Από τον ανωτέρω πίνακα, γίνεται σαφές πως επιβεβαιώνεται η αρχική μας εκτίμηση σχετικά με την “υποβάθμιση” των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων. Τόσο το όριο διαρροής, όσο η μέγιστη εφελκυστική τάση και η τάση θραύσης μειώνονται σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης.

Στη συνέχεια, παραθέτουμε τα διαγράμματα μεταβολής των μέσων μηχανικών ιδιοτήτων για τα δοκίμια με αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν οι ακόλουθες καμπύλες μεταβολής:

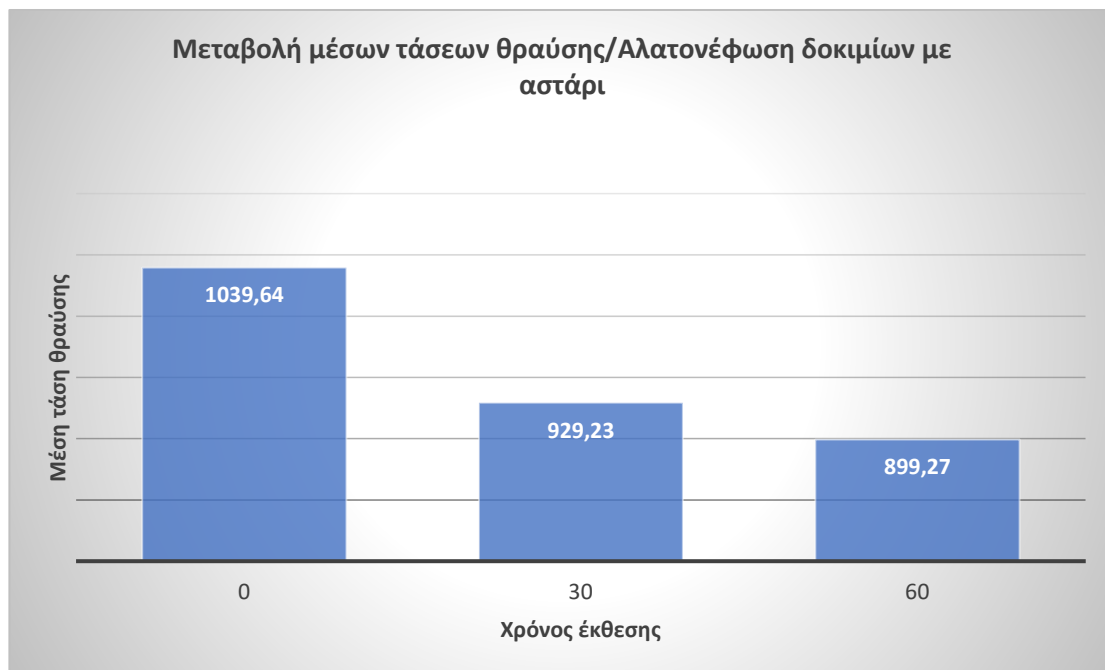
- I. Μέσων τιμών ορίων διαρροής σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης
- II. Μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης
- III. Μέσων τιμών τάσεων θραύσης σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης



Διάγραμμα 9.11: Καμπύλη μεταβολής μέσων τιμών ορίων διαρροής δοκιμίων με αστάρι – Θάλαμος αλατονέφωσης



Διάγραμμα 9.12: Καμπύλη μεταβολής μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων δοκιμίων με αστάρι – Θάλαμος αλατονέφωσης



Εικόνα 9.13: Ραβδόγραμμα μεταβολής μέσων τιμών τάσεων θραύσης δοκιμίων με αστάρι – Θάλαμος αλατονέφωσης

**Συμπέρασμα:** Είναι προφανές από τα διαγράμματα 9.11 και 9.12 πως τόσο η μέση τιμή των ορίων διαρροής όσο και των μέγιστων εφελκυστικών τάσεων μειώνονται γραμμικά σε σχέση με το χρόνο έκθεσης των δοκιμίων.

Η προσαρμογή των καμπυλών των διαγραμμάτων αυτών είναι η βέλτιστη δυνατή καθώς ο adjustment factor είναι κοντά στη μονάδα, γεγονός που σημαίνει ότι το φαινόμενο εξελίσσεται γραμμικά και η καμπύλη μεταβολής διέρχεται όσο το δυνατόν πλησιέστερα από τις μέσες πειραματικές τιμές των μηχανικών ιδιοτήτων.

Κάτι ακόμα που αξίζει να επισημανθεί είναι, πως στην περίπτωση της αλατονέφωσης, ο ρυθμός μείωσης των μηχανικών ιδιοτήτων είναι αρκετά μεγαλύτερος σε σχέση με τη διάβρωση δοκιμίων σε λουτρό εμβάπτισης, γεγονός που επιβεβαιώνει τις αρχικές μας εκτιμήσεις, ότι δηλαδή η αλατονέφωση είναι πιο επιθετική διαδικασία διάβρωσης σε σχέση με τη διάβρωση σε λουτρό εμβάπτισης NaCl.

Για παράδειγμα, όπως είδαμε και στην ενότητα 8.9, η μέση τιμή του ορίου διαρροής των δοκιμίων με αστάρι για 35 μέρες διάβρωσης σε λουτρό NaCl αντιστοιχεί σε 394.50 MPa. Στην περίπτωση της αλατονέφωσης, η μέση τιμή του ορίου διαρροής των δοκιμίων με αστάρι για 30 μέρες αντιστοιχεί σε 390.25 MPa, τιμή πολύ μικρότερη σε σχέση με την πρώτη. Κατ'αντιστοιχία, τα ίδια συμπεράσματα μπορούν να προκύψουν και αν συγκρίνουμε τις μέσες τιμές των μέγιστων εφελκυστικών τάσεων για τα ίδια χρονικά διαστήματα διάβρωσης για ίδιου τύπου δοκίμια και διαφορετικές διαδικασίες διάβρωσης.

Τέλος, στην τάση θραύσης παρουσιάζεται πολύ μεγάλο άλμα εξασθένησης μεταξύ των 0 – 30 ημερών διάβρωσης, ενώ στο τελευταίο διάστημα η μείωση της φτάνει περίπου στο 1/3 της αρχικής. Αν συγκρίνουμε τα ραβδογράμματα 8.15 και 9.13 παρατηρούμε ότι η τάση θραύσης των δοκιμίων με αστάρι για διάβρωση σε λουτρό εμβάπτισης NaCl ανέρχεται στα 935.65 MPa, αρκετά μικρότερη από τα 929.23 MPa που αντιστοιχεί για περίοδο διάβρωσης 30 μέρες και μέθοδο διάβρωσης την αλατονέφωση. Από αυτό, συμπεραίνουμε, ότι η

αλατονέφωση προκαλεί μεγαλύτερη ψαθυρότητα στα δοκίμια για ίδιο περίπου διάστημα διάβρωσης, γεγονός που οδηγεί σε ταχύτερη αστοχία των υλικών.

## 9.10 Μελέτη μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων χωρίς αστάρι λόγω διάβρωσης στο θάλαμο αλατονέφωσης

Στη συνέχεια παρατίθεται ο συνοπτικός πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων 9.14 όπου παρουσιάζονται ο αριθμός του δοκιμίου, η μέθοδος διάβρωσης, ο χρόνος έκθεσης καθώς και οι βασικές μηχανικές ιδιότητες των δοκιμίων που αναφέρονται, με σκοπό την ενδελεχή εξέταση της μεταβολής τους έπειτα από τη διάβρωση την οποία υπέστησαν στο θάλαμο αλατονέφωσης. Στην προκειμένη ενότητα, παραθέτουμε αναλυτικά το μηχανισμό διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης για δοκίμια χωρίς αστάρι.

Όπως αναφέρθηκε και στην ενότητα 9.9, εκτός από το συνοπτικό πίνακα μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων, θα ακολουθήσει παρουσίαση καμπυλών του επιβαλλόμενου φορτίου συναρτήσει της επιμήκυνσης των δοκιμίων καθώς και καμπυλών τάσης-παραμόρφωσης. Για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων, χρησιμοποιήθηκε το λογιστικό φύλλο του excel ώστε να διορθώσουμε κατάλληλα τα πειραματικά αποτελέσματα όπως αυτά προέκυψαν από την καταγραφή δεδομένων της μηχανής εφελκυσμού. Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η διατομή κάθε δοκιμίου είναι άμεσα συνδεδεμένη τόσο από τις διαβρωτικές συνθήκες που αυτό εκτέθηκε (λουτρό εμβάπτισης NaCl, θάλαμος αλατονέφωσης) όσο και το χρονικό διάστημα διάβρωσης. Έτσι, δοκίμια που διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης για 60 ημέρες, προφανώς θα έχουν μεγαλύτερη απώλεια μάζας από τα δοκίμια που διαβρώθηκαν για 30 ημέρες, συνεπώς τα πρώτα θα έχουν και μικρότερη αρχική διατομή πριν την έναρξη της μηχανικής δοκιμής εφελκυσμού.

Επίσης, σε γενικές γραμμές ισχύει ότι για τον ίδιο χρόνο διαβρωσης, τα δοκίμια που διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης, παρουσίασαν μεγαλύτερη απώλεια μάζας από τα δοκίμια που διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης και άρα έχουν μικρότερη αρχική διατομή.

Μετά την παρουσίαση των καμπυλών φορτίου-μετατόπισης και τάσης-παραμόρφωσης, με κατάλληλη επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων και χρήση του λογισμικού TableCurve και Excel θα παρατεθούν οι προκύπτουσες καμπύλες μεταβολής **των μέσων τιμών ορίων διαρροής  $\sigma_y$ , των μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων  $\sigma_{UTS}$  καθώς και των μέσων τάσεων θραύσεως των δοκιμίων συναρτήσει του χρόνου έκθεσης**. Ακολουθεί ο συνοπτικός πίνακας μεταβολής των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων χωρίς αστάρι τα οποία διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης.



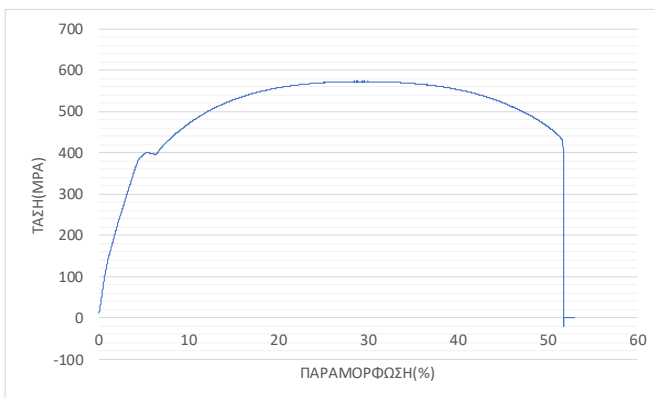
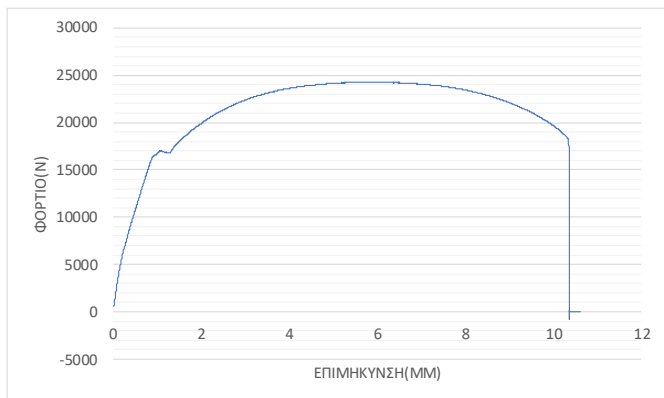
ΔΟΚΙΜΙΑ ΧΩΡΙΣ ΑΣΤΑΡΙ								
Αριθμός δοκιμίου	Μέθοδος διάβρωσης	Χρόνος έκθεσης [Ημέρες]	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	Τάση θραύσης $\sigma_\theta$ [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]
2	Χωρίς διάβρωση	0	386.41	25.30	560.76	1050.72	48.76	119.63
3	Χωρίς διάβρωση	0	403.39	25.37	570.18	1039.84	51.95	114.47
4	Χωρίς διάβρωση	0	409.63	25.12	578.43	1028.36	50.33	108.87
16	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	30	391.26	24.26	562.84	924.85	51.74	113.53
28	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	30	394.25	26.01	567.46	929.86	52.24	124.53
36	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	30	395.95	24.23	566.74	935.06	51.69	115.06
34	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	60	380.98	23.65	545.07	891.58	48.87	111.73
35	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	60	394.78	25.13	570.59	900.78	53.33	120.75
30	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	60	384.71	23.64	560.82	841.48	47.78	108.01

Πίνακας 9.14: Συνοπτικός πίνακας μηχανικών ιδιοτήτων για δοκίμια χωρίς αστάρι διαβρωμένα σε θάλαμο αλατονέφωσης.

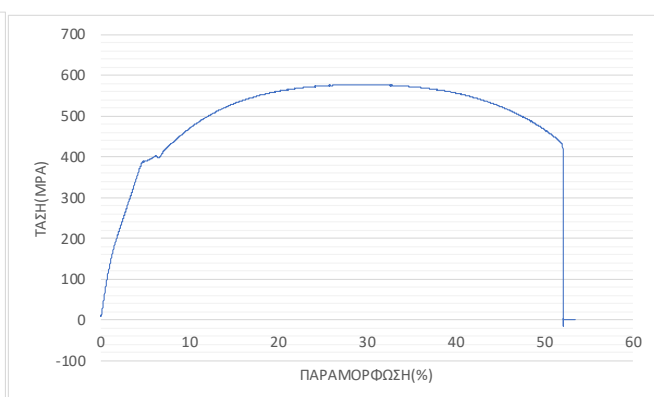
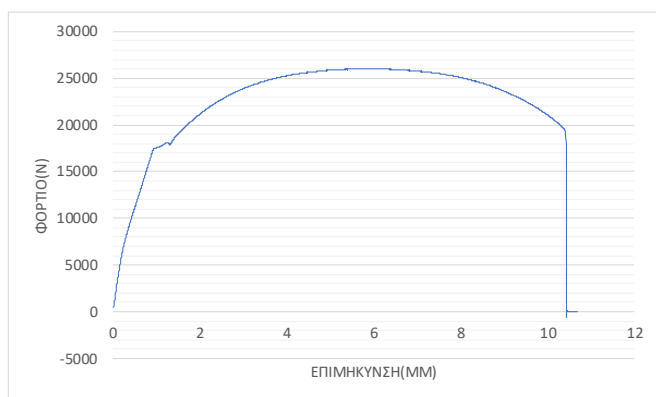
Στη συνέχεια, παραθέτουμε τις καμπύλες μεταβολής του επιβαλλόμενου φορτίου συναρτήσει της μετατόπισης, καθώς και τα διαγράμματα τάσης-παραμόρφωσης, βάσει των οποίων προέκυψαν οι 3 βασικές μηχανικές ιδιότητες που αναφέρθηκαν ( $\sigma_y$ ,  $\sigma_{UTS}$ ,  $\sigma_\theta$ ) καθώς και η % παραμόρφωση των δοκιμίων μέχρι την αστοχία αλλά και η ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση (J).

Τα δοκίμια στα οποία θα αναφέρονται οι παρακάτω καμπύλες είναι αυτά που παρουσιάστηκαν στο συνοπτικό πίνακα 9.14, εκείνα δηλαδή τα οποία διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης και έχουν ψηγματοβοληθεί (δοκίμια χωρίς αστάρι).

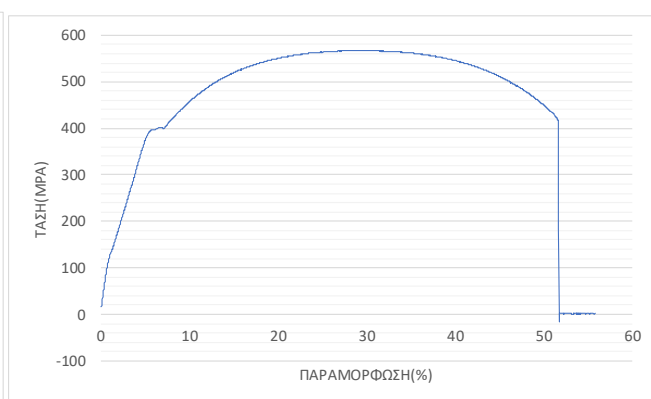
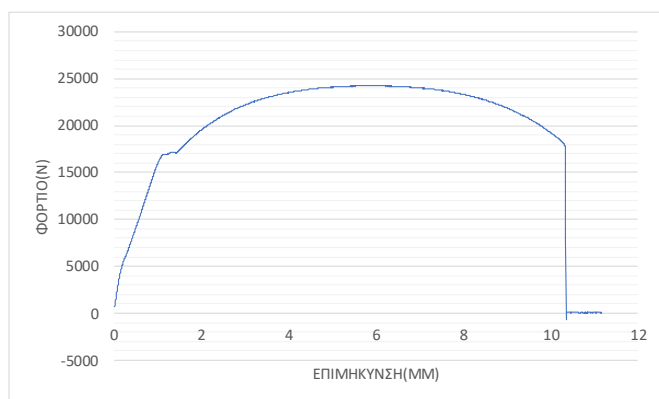
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
16	400.96	24.26	562.84	51.74	113.53	924.85



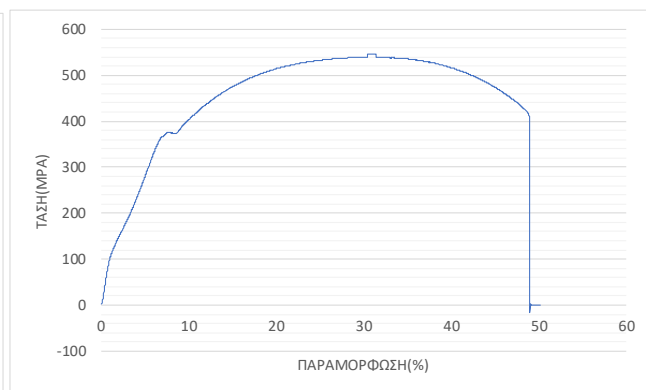
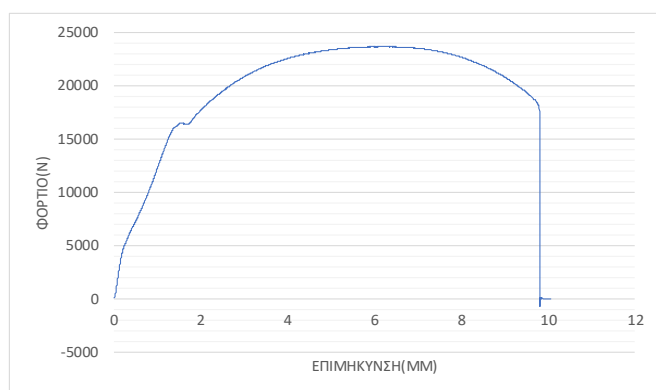
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
28	394.25	26.01	567.46	52.24	124.53	929.86



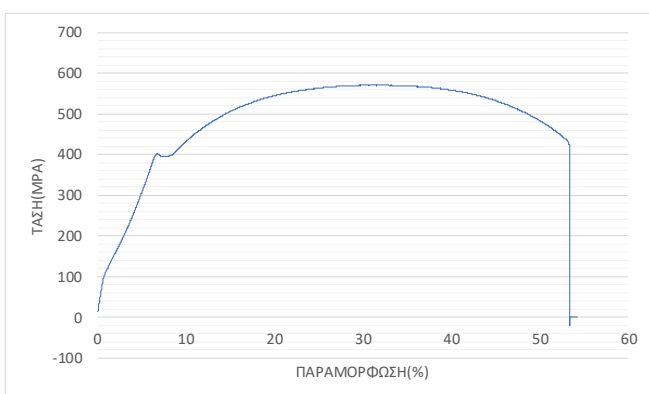
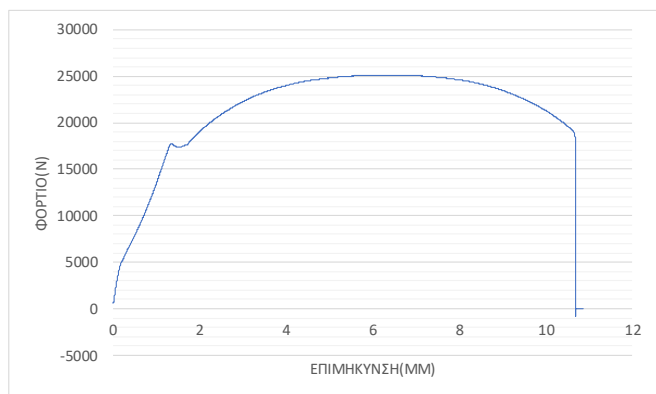
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
36	395.95	24.23	566.74	51.69	115.06	935.06



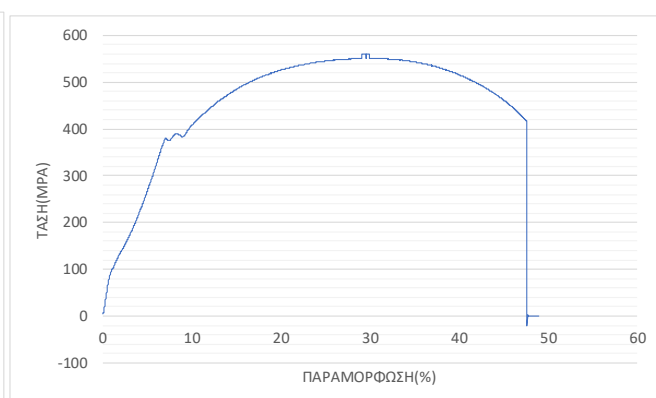
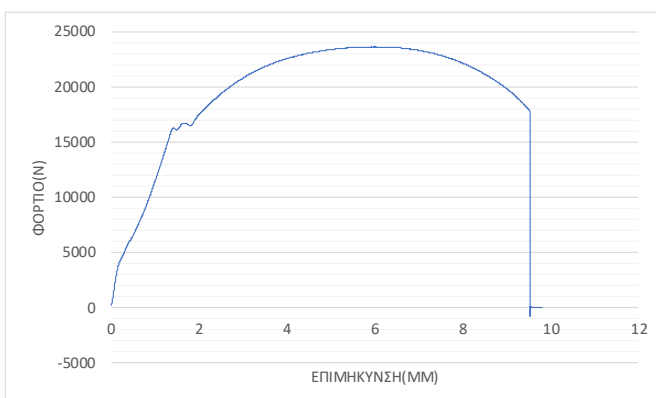
Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
34	380.98	23.65	545.07	48.87	111.73	891.58



Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
35	394.78	25.13	570.59	53.33	120.75	900.78



Αριθμός δοκιμίου	Όριο διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέγιστη εφελκυστική δύναμη [kN]	Μέγιστη εφελκυστική τάση ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	% Παραμόρφωση δοκιμίου	Ενέργεια στη μέγιστη εφελκυστική τάση [J]	Τάση θραύσης [MPa]
30	384.71	23.64	560.82	47.78	108.01	841.48



### 9.11 Αναλυτική παρουσίαση μεταβολής μηχανικών ιδιοτήτων δοκιμίων χωρίς αστάρι λόγω διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης με χρήση λογισμικού TableCurve-Excel

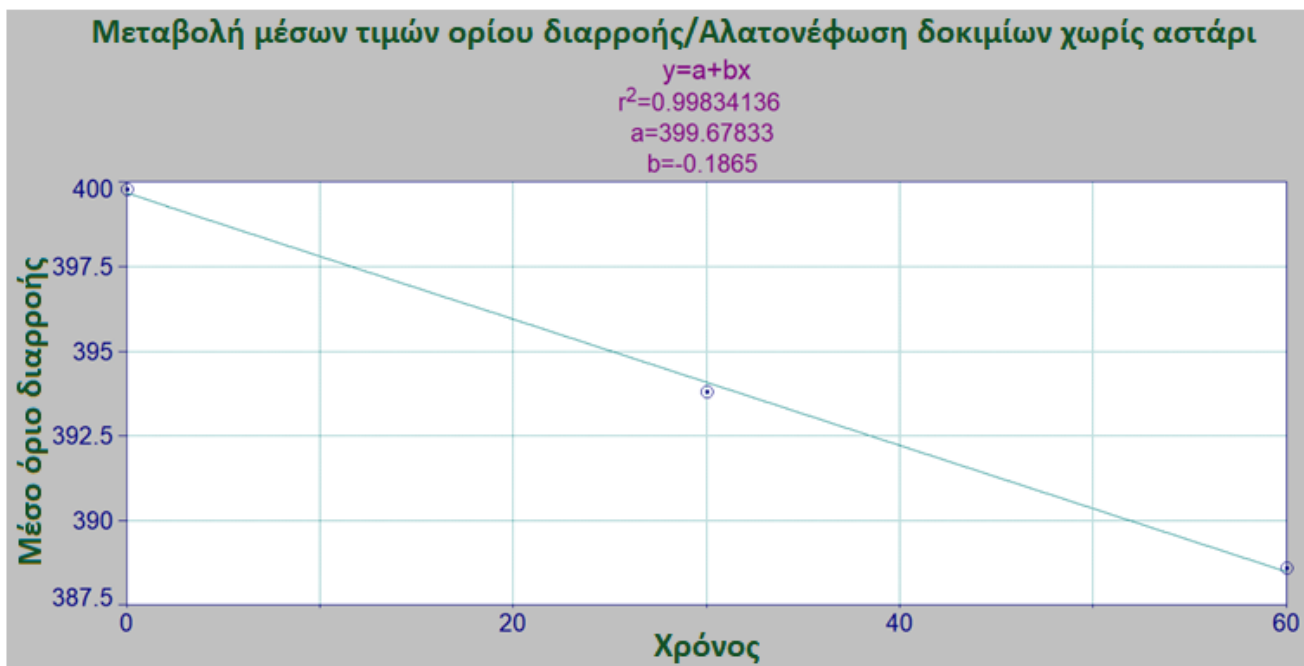
<b>ΔΟΚΙΜΙΑ ΧΩΡΙΣ ΑΣΤΑΡΙ</b>					
Αριθμός δοκιμίων	Μέθοδος διάβρωσης	Χρόνος έκθεσης [Ημέρες]	Μέση τιμή ορίου διαρροής $\sigma_y$ [MPa]	Μέση τιμή μέγιστης εφελκυστικής τάσης ( $\sigma_{UTS}$ ) [MPa]	Μέση τάση θραύσης $\sigma_\theta$ [MPa]
2,3,4	Χωρίς διάβρωση	0	<b>399.81</b>	<b>569.79</b>	<b>1039.64</b>
16,28,36	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	30	<b>393.82</b>	<b>565.58</b>	<b>929.92</b>
34,35,30	Διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης	60	<b>388.62</b>	<b>558.83</b>	<b>877.95</b>

Πίνακας 9.15: Συνοπτικός πίνακας μέσων τιμών μηχανικών ιδιοτήτων για δοκίμια χωρίς αστάρι διαβρωμένα σε θάλαμο αλατονέφωσης.

Από τον ανωτέρω πίνακα, γίνεται σαφές πως επιβεβαιώνεται η αρχική μας εκτίμηση σχετικά με την “υποβάθμιση” των μηχανικών ιδιοτήτων των δοκιμίων. Τόσο το όριο διαρροής, όσο η μέγιστη εφελκυστική τάση και η τάση θραύσης μειώνονται σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης.

Στη συνέχεια, παραθέτουμε τα διαγράμματα μεταβολής των μέσων μηχανικών ιδιοτήτων για τα δοκίμια χωρίς αστάρι, τα οποία διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης. Πιο συγκεκριμένα, θα παρουσιαστούν οι ακόλουθες καμπύλες μεταβολής:

- I. Μέσων τιμών ορίων διαρροής σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης
- II. Μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης
- III. Μέσων τιμών τάσεων θραύσης σε σχέση με το χρόνο διάβρωσης

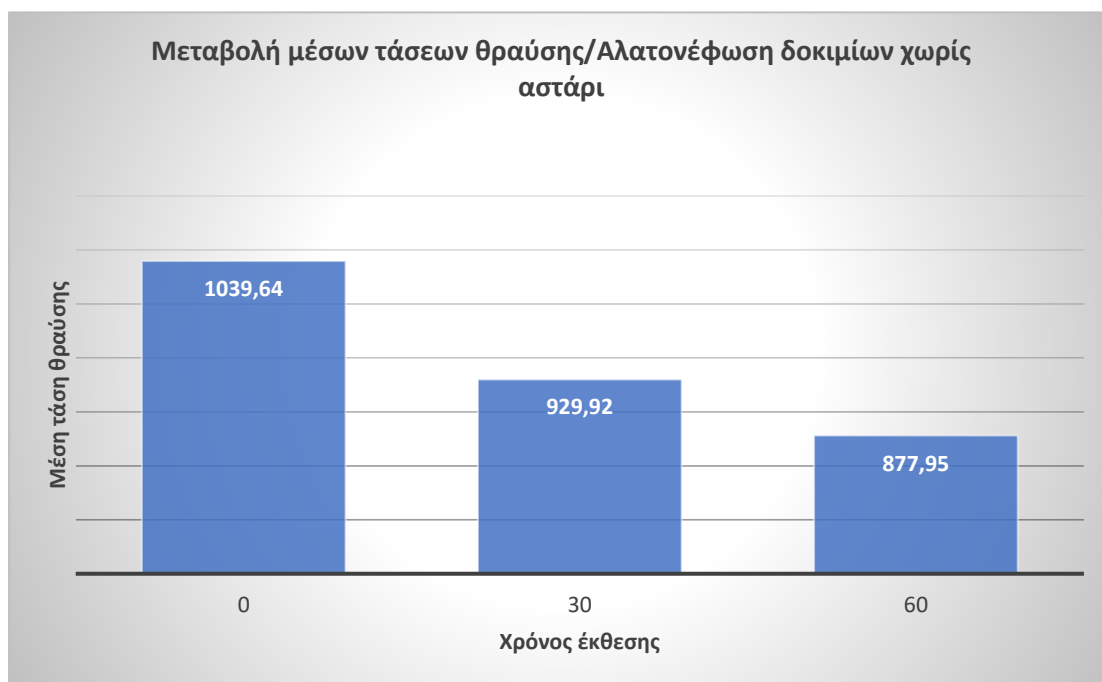


Διάγραμμα 9.16: Καμπύλη μεταβολής μέσων τιμών ορίων διαρροής δοκιμίων χωρίς αστάρι – Θάλαμος αλατονέφωσης



Διάγραμμα 9.17: Καμπύλη μεταβολής μέσων τιμών μεγίστων εφελκυστικών τάσεων δοκιμίων χωρίς αστάρι – Θάλαμος αλατονέφωσης





Εικόνα 9.18: Ραβδόγραμμα μεταβολής μέσων τιμών τάσεων θραύσης δοκιμίων χωρίς αστάρι – Θάλαμος αλατονέφωσης

**Συμπέρασμα:** Όπως είδαμε και στην ενότητα 9.9, τόσο το μέσο όριο διαρροής όσο και η μέση μέγιστη εφελκυστική τάση των δοκιμίων χωρίς αστάρι για διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης μειώνονται γραμμικά σε σχέση με το χρόνο έκθεσης.

Οι συντελεστές προσαρμογής των διαγραμμάτων 9.16 και 9.17 είναι σχεδόν ίσοι με τη μονάδα, γεγονός που μας επιβεβαιώνει ότι το μοντέλο εξελίσσεται γραμμικά και οι καμπύλες μεταβολής των μέσων μηχανικών ιδιοτήτων παρουσιάζουν βέλτιστη προσαρμογή σε σχέση με τα πειραματικά μας σημεία.

Κάτι τελευταίο που αξίζει να επισημανθεί, είναι πως τα δοκίμια χωρίς αστάρι που διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης παρουσιάζουν μεγαλύτερο ρυθμό υποβάθμισης των μηχανικών τους ιδιοτήτων σε σχέση με τα αντίστοιχα δοκίμια τα οποία διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης NaCl για τον ίδιο χρόνο έκθεσης.

Για παράδειγμα, για 35 μέρες διάβρωσης σε λουτρό εμβάπτισης NaCl, η μέση τιμή του ορίου διαρροής για τα δοκίμια χωρίς αστάρι ανέρχεται στα 568.47 MPa, ενώ η τιμή αυτή πέφτει στα 565.58 MPa στην περίπτωση διάβρωσης σε θάλαμο αλατονέφωσης για το ίδιο χρονικό διάστημα έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον.

Σχετικά με την τάση θραύσης, ισχύουν ακριβώς τα ίδια με όσα αναφέρθηκαν στα συμπεράσματα της ενότητας 9.9, με τη μόνη διαφορά ότι στις 60 ημέρες αλατονέφωσης το φαινόμενο έχει εξελιχθεί με ταχύτερους ρυθμούς στα δοκίμια χωρίς αστάρι συγκριτικά με τα δοκίμια που προστατεύονται από το αστάρι.

## Βιβλιογραφία

- [1] Καρύδης, Π. (2002). Επιθεώρηση, Συντήρηση Και Επισκευή Της Μεταλλικής Κατασκευής Του Πλοίου. Αθήνα: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις ΕΜΠ.
- [2] [http://www.harbour-maritime.com/uploads/1/2/9/8/12987200/bulk\\_carrier\\_practice.pdf](http://www.harbour-maritime.com/uploads/1/2/9/8/12987200/bulk_carrier_practice.pdf)
- [3] Γ. Χρυσουλάκης, Δ. Παντελής, “Επιστήμη και τεχνολογία των υλικών”, Παπασωτηρίου, Αθήνα, 2008, Β Έκδοση
- [4] Χρυσουλάκης. (2007). Επιστήμη και Τεχνολογία των Μεταλλικών Υλικών. Αθήνα: Παπασωτηρίου.
- [5] [https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BSMM213/TMII\\_%CE%9C%CE%AC%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1\\_2.pdf](https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BSMM213/TMII_%CE%9C%CE%AC%CE%B8%CE%B7%CE%BC%CE%B1_2.pdf)
- [6] <http://courseware.mech.ntua.gr/ml26012/mathimata/FeC.pdf>
- [7] <https://www.m3.tuc.gr/ANAGNWSHTHRIO/YLIKA/SHMEIWSEIS/6%20SIDHROUXA%20KRAMATAw.pdf>
- [8] Β.Ι.Παπάζογλου, “Ναυπηγική Τεχνολογία”, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα, 1995
- [9] Παντελής. (2006). Διαβρωση Και Προστασία Ναυπηγικών Κατασκευών. Αθήνα: ΕΜΠ.
- [10] [https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=1189&context=all\\_dissertations](https://commons.wmu.se/cgi/viewcontent.cgi?article=1189&context=all_dissertations)
- [11] <https://ww2.eagle.org/en/rules-and-resources/rules-and-guides.html>
- [12] <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=kts&NM=287>
- [13] [https://www.leonghuat.com/plates/comparison\\_grades\\_for\\_shipbuildi.htm](https://www.leonghuat.com/plates/comparison_grades_for_shipbuildi.htm)
- [14] <http://www.ysteelplate.com/LR-Grade-AH32-AH36.html>
- [15] <https://gangsteel.com/abs-grade-ah32-ab-ah32-steel-plate-supplier/>
- [16] <https://e-class.teilar.gr/modules/document/file.php/GT8E116/>
- [17] Μανωλάκος, Δ., 2018. Jet Machining [WWW Document]. mycourses.ntua.gr.
- [18] <http://blog.novaglass.gr/2014/08/blog-post.html>
- [19] [http://dml.chania.teicrete.gr/WJM/WJM\\_en.html](http://dml.chania.teicrete.gr/WJM/WJM_en.html)
- [20] [https://en.wikipedia.org/wiki/Water\\_jet\\_cutter](https://en.wikipedia.org/wiki/Water_jet_cutter)
- [21] [file:///C:/Users/User/Downloads/APP\\_GUIDE\\_General\\_Surface\\_Prep\\_Guide.pdf](file:///C:/Users/User/Downloads/APP_GUIDE_General_Surface_Prep_Guide.pdf)
- [22] <https://www.standard.no/pagefiles/1167/m-501.pdf>
- [23] <http://lms.mech.upatras.gr/LMS/files-1/students-area/mekhanourgike-tekhnologia-ergasterio-i/subject-files/ekpaideutiko-uliko/basics-of-grinding-leaflet.pdf>
- [24] [http://antoxi-aspaite.blogspot.com/p/blog-page\\_06.html](http://antoxi-aspaite.blogspot.com/p/blog-page_06.html)
- [25] <https://eclass.gunet.gr/modules/document/file.php/>
- [26] <https://slideplayer.gr/slide/11142745/>
- [27] [http://portal.tee.gr/portal/page/portal/TEE\\_EVOIAS/XALIBON%20OPLISMOY.pdf](http://portal.tee.gr/portal/page/portal/TEE_EVOIAS/XALIBON%20OPLISMOY.pdf)
- [28] <http://thesis.ekt.gr/thesisBookReader/id/26976#page/8/mode/2up>
- [29] ASTM, S.P., 2011. B 0117 Operating Salt Spray (Fog) Apparatus. Astm 1–12. <https://doi.org/10.1520/B0117-11.2>
- [30] “Διάβρωση και προστασία υλικών” Σύγγραμμα, Βασιλείου Π., Σκουλικίδης Θ., 2007, Συμείων, ISBN: 978-960-7888-85-3
- [31] <http://cathodicprotection.gr/Cathodic-Protection.php>
- [32] [https://en.wikipedia.org/wiki/Cathodic\\_protection](https://en.wikipedia.org/wiki/Cathodic_protection)
- [33] <https://www.tecnoseal.it/it/blog/tecnoseal-academy/433-tecnoseal-answers-protezione-passiva-o-attiva.html>
- [34] <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:8044:ed-3:v1:en:term:2.01>

- [35]<https://link.springer.com/article/10.1007/BF01161200>
- [36]<https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/9781845640323/9781845640323006FU1.pdf>
- [37]<http://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB22556.pdf>
- [38]<https://epubs.scu.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1047&context=acmsm23>
- [39]<http://users.sch.gr/marbagana/entheta/entheta03.html>
- [40][https://www.chemeng.ntua.gr/dpms\\_ylika/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%94.%20%CE%A5%CF%86%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE.pdf](https://www.chemeng.ntua.gr/dpms_ylika/%CE%92%CE%B9%CE%B2%CE%BB%CE%AF%CE%BF%20%CE%94.%20%CE%A5%CF%86%CE%B1%CE%BD%CF%84%CE%AE.pdf)
- [41][https://en.wikipedia.org/wiki/Salt\\_spray\\_test](https://en.wikipedia.org/wiki/Salt_spray_test)
- [42][http://library.tee.gr/digital/techr/2006/techr\\_2006\\_3\\_pistofidis.pdf](http://library.tee.gr/digital/techr/2006/techr_2006_3_pistofidis.pdf)
- [43]<http://www.galvanizeit.com/uploads/ASTM-B-117-yr11.pdf>
- [44]<https://www.aua.gr/fasseas/optika%20mikroskopia.htm>
- [45][http://www.physics.ntua.gr/~micronano/ERG%20TEXNIKES/Simeioseis\\_TEM.pdf](http://www.physics.ntua.gr/~micronano/ERG%20TEXNIKES/Simeioseis_TEM.pdf)
- [46][http://www.mie.uth.gr/ekp\\_yliko/%CE%A3%CE%97%CE%9C%CE%95%CE%99%CE%A9%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3\\_%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%99%CE%9F%CE%A5\\_%CE%A6%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%9A%CE%97%CE%A3\\_%CE%9C%CE%95%CE%A4%CE%91%CE%9B%CE%9B%CE%9F%CE%A5%CE%A1%CE%93%CE%99%CE%91%CE%A3.pdf](http://www.mie.uth.gr/ekp_yliko/%CE%A3%CE%97%CE%9C%CE%95%CE%99%CE%A9%CE%A3%CE%95%CE%99%CE%A3_%CE%95%CE%A1%CE%93%CE%91%CE%A3%CE%A4%CE%97%CE%A1%CE%99%CE%9F%CE%A5_%CE%A6%CE%A5%CE%A3%CE%99%CE%9A%CE%97%CE%A3_%CE%9C%CE%95%CE%A4%CE%91%CE%9B%CE%9B%CE%9F%CE%A5%CE%A1%CE%93%CE%99%CE%91%CE%A3.pdf)
- [47]<http://ikee.lib.auth.gr/record/126494/files/GRI-2011-6655.pdf>
- [48][https://www.atm-m.com/products?gclid=CjwKCAjwibzsBRAMEiwA1pHZrIQNVU7Q9iQLqLwnX-OWpgS-jAEpyirzc68jm5x-R1lfd9E6pdDifhoCfAsQAvD\\_BwE](https://www.atm-m.com/products?gclid=CjwKCAjwibzsBRAMEiwA1pHZrIQNVU7Q9iQLqLwnX-OWpgS-jAEpyirzc68jm5x-R1lfd9E6pdDifhoCfAsQAvD_BwE)
- [49][https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-3.2\\_A.Tsouknidas.pdf](https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-3.2_A.Tsouknidas.pdf)
- [50][https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-2.2\\_A.Tsouknidas.pdf](https://eclass.teiwm.gr/modules/document/file.php/BM105/Lecture-2.2_A.Tsouknidas.pdf)
- [51]Λιούτας, Χρ. Β., Σημειώσεις για το μάθημα «Εισαγωγή στις τεχνικές της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας – Μικροσκοπίες Σαρώσεως»
- [52][https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY349/notes/2017/lecture\\_6.pdf](https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY349/notes/2017/lecture_6.pdf)

# Παράρτημα

## Μετρήσεις πάχους δοκιμίων

Παρακάτω φαίνονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων του πάχους των δοκιμίων μικρών διαστάσεων. Συγκεκριμένα τα αποτελέσματα αφορούν 12 δοκίμια με και χωρίς αστάρι που διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης και 12 δοκίμια μικρών διαστάσεων με και χωρίς αστάρι που διαβρώθηκαν σε θάλαμο αλατονέφωσης. Η μέτρηση έγινε σε 4 διαφορετικά σημεία κάθε δοκιμίου και λήφθηκε η μέση τιμή από τις μετρήσεις αυτές.

Τα πάχη των δοκιμίων είναι εκφρασμένα σε [mm].

Εμβάπτιση δοκιμίων μικρών διαστάσεων με αστάρι

Αριθμός δοκιμίου	Αρχικό πάχος	Τελικό πάχος	Μείωση πάχους	Ημέρες έκθεσης
2	6.24	6.20	0.04	20
4	6.17	6.15	0.02	20
7	6.17	6.15	0.02	20
8	6.27	6.22	0.05	40
9	6.24	6.21	0.03	40
10	6.09	6.05	0.04	40
11	6.09	6.05	0.04	60
12	6.10	6.08	0.02	60
14	6.19	6.15	0.04	60
15	6.10	6.04	0.06	75
16	6.10	6.04	0.06	75
17	6.09	6.04	0.05	75

#### Εμβάπτιση δοκιμίων μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι

Αριθμός δοκιμίου	Αρχικό πάχος	Τελικό πάχος	Μείωση πάχους	Ημέρες έκθεσης
2'	6.11	6.09	0.02	20
4'	6.21	6.09	0.12	20
7'	6.15	6.12	0.03	20
8'	6.18	6.12	0.06	40
9'	6.23	6.19	0.04	40
10'	6.21	6.15	0.06	40
11'	6.14	6.12	0.02	60
12'	6.22	6.11	0.11	60
14'	6.09	6.06	0.03	60
15'	6.22	6.15	0.07	75
16'	6.15	6.11	0.04	75
17'	6.16	6.12	0.04	75

#### Αλατονέφωση δοκιμίων μικρών διαστάσεων με αστάρι

Αριθμός δοκιμίου	Αρχικό πάχος	Τελικό πάχος	Μείωση πάχους	Ημέρες έκθεσης
18	6.13	6.12	0.01	20
19	6.36	6.35	0.01	20
20	6.20	6.15	0.05	20
21	6.49	6.40	0.09	40
22	6.25	6.22	0.03	40
23	6.24	6.20	0.04	40
24	6.19	6.17	0.02	60
25	6.17	6.15	0.02	60
27	6.18	6.15	0.03	60
28	6.24	6.21	0.03	75
29	6.18	6.14	0.04	75
30	6.18	6.12	0.06	75

### Αλατονέφωση δοκιμών μικρών διαστάσεων χωρίς αστάρι

Αριθμός δοκιμίου	Αρχικό πάχος	Τελικό πάχος	Μείωση πάχους	Ημέρες έκθεσης
18'	6.15	6.05	0.10	20
19'	6.12	6.07	0.05	20
20'	6.22	6.17	0.05	20
21'	6.32	6.26	0.06	40
22'	6.17	6.13	0.04	40
23'	6.17	6.13	0.04	40
24'	6.05	6.03	0.02	60
25'	6.07	6.04	0.03	60
27'	6.15	6.12	0.03	60
28'	6.07	6.04	0.03	75
29'	6.05	6.00	0.05	75
30'	6.20	6.17	0.03	75

### Παρατηρήσεις/Συμπεράσματα

- ❖ Σε κάθε περίπτωση τα πάχη των δοκιμών μετά τη διάβρωση είναι μικρότερα από τα αρχικά πάχη και αυτό οφείλεται στο ότι με τη διάβρωση παρατηρείται απώλεια μάζας όπως είδαμε και στα πειραματικά αποτελέσματα από τη μελέτη των διαγραμμάτων της διάβρωσης σε εμβάπτιση και αλατονέφωση.
- ❖ Σε γενικές γραμμές, η μείωση πάχους των δοκιμών μετά τη διάβρωση σε αλατονέφωση είναι μεγαλύτερη από την αντίστοιχη μείωση πάχους των δοκιμών που διαβρώθηκαν σε λουτρό εμβάπτισης. Παρ'όλα αυτά οι τάξεις μεγέθους των τιμών αυτών είναι ενδεικτικές λόγω των μεγάλων επιφανειακών διακυμάνσεων στην τραχύτητα και δεν αποτελούν σε καμία περίπτωση πειραματικό συμπέρασμα σχετικά με το «πόσο» μεγαλύτερες είναι οι τιμές αυτές συγκριτικά μεταξύ των μεθόδων διάβρωσης.
- ❖ Τέλος, όσο μεγαλύτερο είναι το διάστημα έκθεσης σε διαβρωτικό περιβάλλον, τόσο μεγαλύτερη πρέπει να είναι και η μείωση του πάχους των δοκιμών, αφού η μάζα συνεχώς μειώνεται (για διάφορες τιμές του ρυθμού διάβρωσης).



## Μετρήσεις διατομών δοκιμίων στην περιοχή του λαιμού

**Σημείωση:** Στους πίνακες που παρατίθενται παρακάτω, έχουν σημειωθεί και οι διατομές των blank δοκιμίων (2,3,4) για λόγους πληρότητας. Με τον τρόπο αυτό μπορούμε να βγάλουμε πιο ασφαλή συμπεράσματα σχετικά με τη μεταβολή των διατομών των δοκιμίων λόγω απώλειας μάζας εξ' αιτίας της διάβρωσης που έχουν υποστεί τόσο από την εμβάπτιση σε λουτρό NaCl όσο και από την έκθεση στο θάλαμο αλατονέφωσης.

### Εμβάπτιση δοκιμίων με αστάρι

Αριθμός δοκιμίου	Αρχική διατομή λαιμού [mm <sup>2</sup> ]	Τελική διατομή λαιμού [mm <sup>2</sup> ]	Ημέρες έκθεσης
2	45.77	17.94	0
3	44.51	17.52	0
4	43.42	18.01	0
12	42.94	18.7	15
19	43.78	18.98	15
22	45.24	19.74	15
11	45.73	19.89	35
20	43.80	18.95	35
24	43.49	19.57	35
23	44.24	20.00	60
9	44.60	19.81	60
10	43.96	18.91	60

#### Εμβάπτιση δοκιμίων χωρίς αστάρι

Αριθμός δοκιμίου	Αρχική διατομή λαιμού [mm <sup>2</sup> ]	Τελική διατομή λαιμού [mm <sup>2</sup> ]	Ημέρες έκθεσης
2	45.77	17.94	0
3	44.51	17.52	0
4	43.42	18.01	0
15	44.01	17.52	15
26	45.75	19.08	15
29	44.22	19.15	15
13	44.47	20.34	35
25	43.46	19.59	35
18	42.85	19.32	35
27	43.96	20.05	60
17	43.15	19.24	60
14	43.63	19.37	60

#### Αλατονέφωση δοκιμίων με αστάρι

Αριθμός δοκιμίου	Αρχική διατομή λαιμού [mm <sup>2</sup> ]	Τελική διατομή λαιμού [mm <sup>2</sup> ]	Ημέρες έκθεσης
2	45.77	17.94	0
3	44.51	17.52	0
4	43.42	18.01	0
7	44.80	19.15	30
8	43.32	19.96	30
21	43.40	19.38	30
31	44.00	20.34	60
32	43.25	20.89	60
33	44.00	19.34	60

#### Αλατονέφωση δοκιμίων χωρίς αστάρι

Αριθμός δοκιμίου	Αρχική διατομή λαιμού [mm <sup>2</sup> ]	Τελική διατομή λαιμού [mm <sup>2</sup> ]	Ημέρες έκθεσης
2	45.77	17.94	0
3	44.51	17.52	0
4	43.42	18.01	0
16	42.35	19.20	30
28	45.02	20.30	30
36	42.76	18.92	30
34	43.88	20.02	60
35	44.04	20.38	60
30	42.92	21.17	60

#### Παρατηρήσεις/Συμπεράσματα

- ❖ Σε γενικές γραμμές από τους ανωτέρω πίνακες, μπορούμε να αποφανθούμε ότι τόσο στο μηχανισμό διάβρωσης με εμβάπτιση σε λουτρό NaCl όσο και στη διάβρωση σε θάλαμο αλατονέφωσης, όσο μεγαλύτερη είναι η χρονική διάρκεια έκθεσης των δοκιμίων, τόσο η αρχική διατομή του «λαιμού» είναι μικρότερη λόγω της απώλειας μάζας που παρατηρείται κατά τη διάρκεια του φαινομένου διάβρωσης. Μάλιστα, αξίζει να επισημανθεί πως η μείωση του πάχους της αρχικής διατομής στην περιοχή του «λαιμού» είναι μεγαλύτερη στα δοκίμια χωρίς αστάρι καθώς εκεί ο ρυθμός διάβρωσης της παράπλευρης επιφάνειας από τη μονωμένη επιφάνεια είναι ιδιαίτερα υψηλός.
- ❖ Επιπρόσθετα, παρατηρούμε πως η διατομή του «λαιμού» μετά την αστοχία των δοκιμίων αυξάνει με την αύξηση του χρόνου έκθεσης των δοκιμίων σε διαβρωτικό περιβάλλον. Το συμπέρασμα αυτό είναι πολύ σημαντικό γιατί επιβεβαιώνει το γεγονός πως όσο αυξάνεται η διάβρωση των δοκιμίων τόσο αυξάνεται η ψαθυρότητά τους, συνεπώς μειώνεται η πλαστική παραμόρφωση και το elongation μέχρι την περιοχή της θραύσης. Συνεπώς για μεγάλους χρόνους έκθεσης, οι διατομές των «λαιμών» κατά την αστοχία των δοκιμίων θα πρέπει να είναι μεγαλύτερες σε σύγκριση με τις διατομές για μικρότερους χρόνους έκθεσης.

## Παρατήρηση περιοχής θραύσης των δοκιμών χάλυβα ΑΗ36 με χρήση SEM<sup>30</sup>

Στη συνέχεια παρατίθεται ένας συνοπτικός πίνακας, ο οποίος περιέχει τον αριθμό των δοκιμών τα οποία μελετήθηκαν στην περιοχή της θραύσης με χρήση της τεχνολογίας του SEM. Επίσης, περιέχει πληροφορίες σχετικά με το είδος των δοκιμών που μελετάμε (με αστάρι ή χωρίς) καθώς και το χρόνο διάβρωσης στο αντίστοιχο διαβρωτικό περιβάλλον (εμβάπτιση σε λουτρό NaCl ή έκθεση σε θάλαμο αλατονέφωσης).

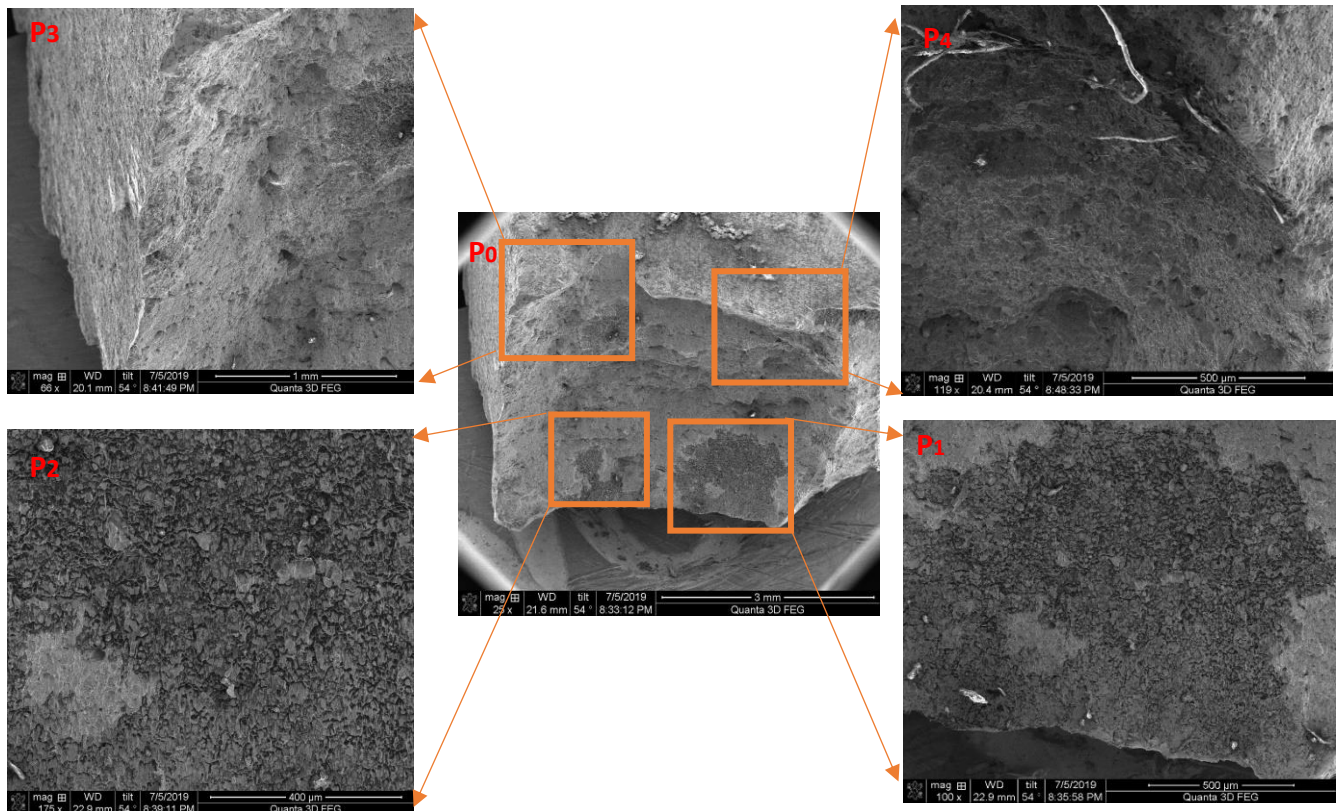
Πληροφορίες σχετικά με τον τρόπο λειτουργίας του SEM και τη διάταξη της εγκατάστασής του έχουν ήδη αναφερθεί στο Θεωρητικό μέρος της παρούσης διπλωματικής εργασίας και συγκεκριμένα στο κεφάλαιο 6. Στο παρόν Παράρτημα θα παρουσιαστούν τα οπτικά αποτελέσματα από τη μελέτη της περιοχής θραύσης των δοκιμών που περιγράφονται στον ακόλουθο συνοπτικό πίνακα, μετά τις δοκιμές εφελκυσμού που πραγματοποιήσαμε στο Μηχανουργείο της σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών.

Συνοπτικός πίνακας SEM					
ΔΟΚΙΜΙΑ ΜΕ ΑΣΤΑΡΙ			ΔΟΚΙΜΙΑ ΧΩΡΙΣ ΑΣΤΑΡΙ		
Αριθμός δοκιμίου	Μέθοδος διάβρωσης	Χρόνος έκθεσης	Αριθμός δοκιμίου	Μέθοδος διάβρωσης	Χρόνος έκθεσης
2	Χωρίς διάβρωση	-	15	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	15
12	Εμβάπτιση σε λουτρό NaCl	15 ημέρες	16	Αλατονέφωση	30
7	Αλατονέφωση	30 ημέρες	30	Αλατονέφωση	60
31	Αλατονέφωση	60 ημέρες			

[51]<sup>30</sup> Λιούτας, Χρ. Β., Σημειώσεις για το μάθημα «Εισαγωγή στις τεχνικές της Ηλεκτρονικής Μικροσκοπίας – Μικροσκοπίες Σαρώσεως»

[52][https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY349/notes/2017/lecture\\_6.pdf](https://www.materials.uoc.gr/el/undergrad/courses/ETY349/notes/2017/lecture_6.pdf)

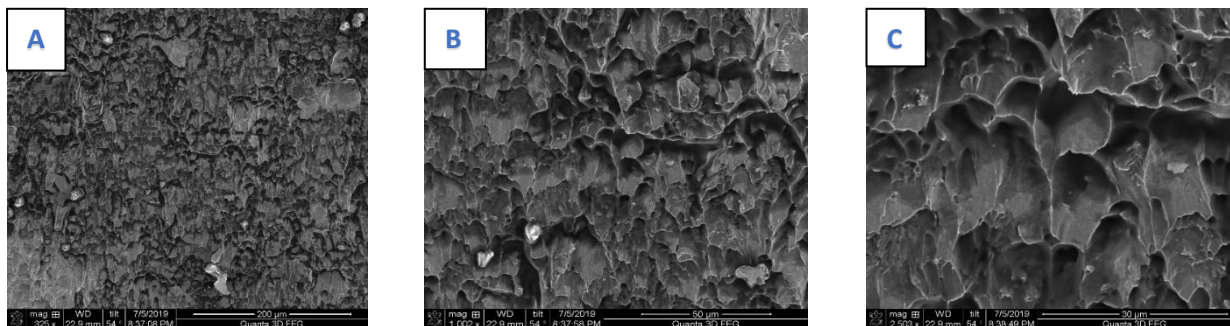
[1] Δοκίμιο 2/Με αστάρι/Χωρίς διάβρωση



Σχόλια σχετικά με την περιοχή θραύσης του δοκιμίου 2:

Όπως είδαμε από το συνοπτικό πίνακα του SEM πρόκειται για δοκίμιο με αστάρι που δεν έχει διαβρωθεί. Οι εικόνες **P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>**, **P<sub>3</sub>**, **P<sub>4</sub>** αντιστοιχούν στις περιοχές της εικόνας **P<sub>0</sub>** όπως αυτές έχουν σημειωθεί και μεγεθυνθεί.

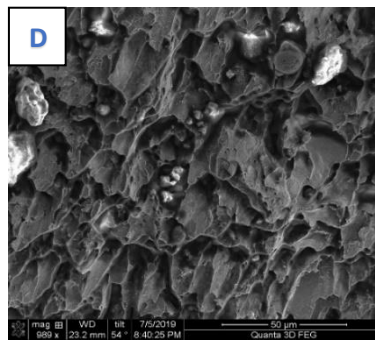
**P<sub>1</sub>**



**P<sub>1</sub>: A,B,C.** Έχει γίνει μεγέθυνση **325x, 1002x, 2503x** αντίστοιχα. Η περιοχή **P<sub>1</sub>** αντιστοιχεί στην κάτω δεξιά περιοχή της επιφάνειας θραύσης. Στις εικόνες αυτές μπορούμε να αποφανθούμε ότι έχει πραγματοποιηθεί όλκιμη θραύση. Αυτό το συμπεραίνουμε λόγω της παρουσίας των dimples, τα οποία είναι χαρακτηριστικά της όλκιμης θραύσης. Τα dimples είναι μέρη της επιφάνειας του υλικού τα οποία έχουν υποστεί πλαστική παραμόρφωση στην διεύθυνση της εφελκυστικής καταπόνησης. Τα λευκά στίγματα πιθανόν να αντιστοιχούν σε σκόνη που επικάθισε στις περιοχές αυτές.

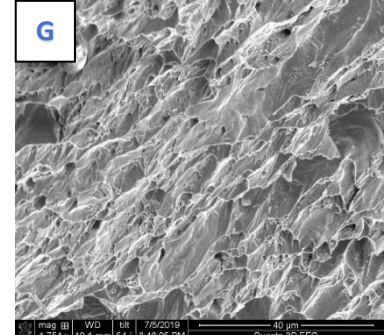
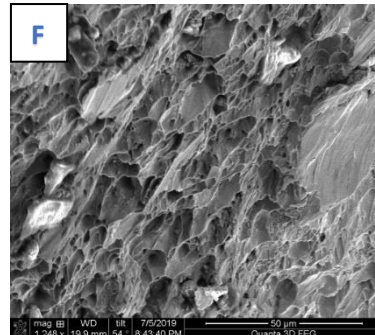
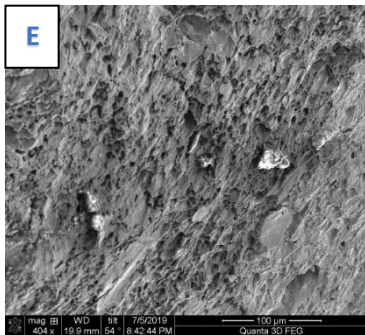


## P2



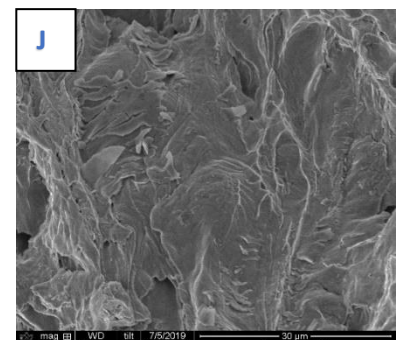
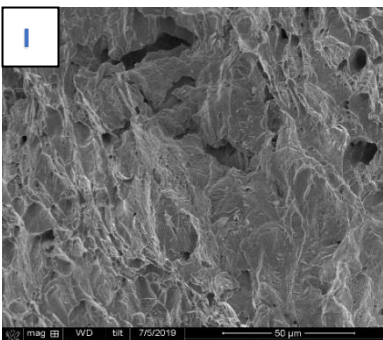
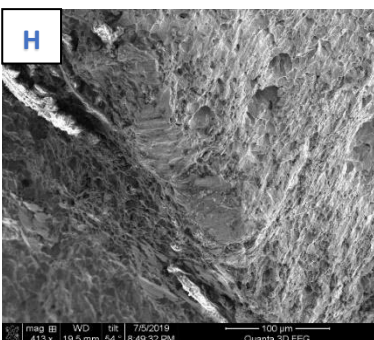
**P<sub>2</sub>: D.** Έχει γίνει μεγέθυνση **989x**. Η περιοχή της εικόνας **P<sub>2</sub>** πρόκειται για διπλανή περιοχή της εικόνας **P<sub>1</sub>**. Ισχύουν όσα αναφέρθηκαν για την εικόνα **P<sub>1</sub>**.

## P3



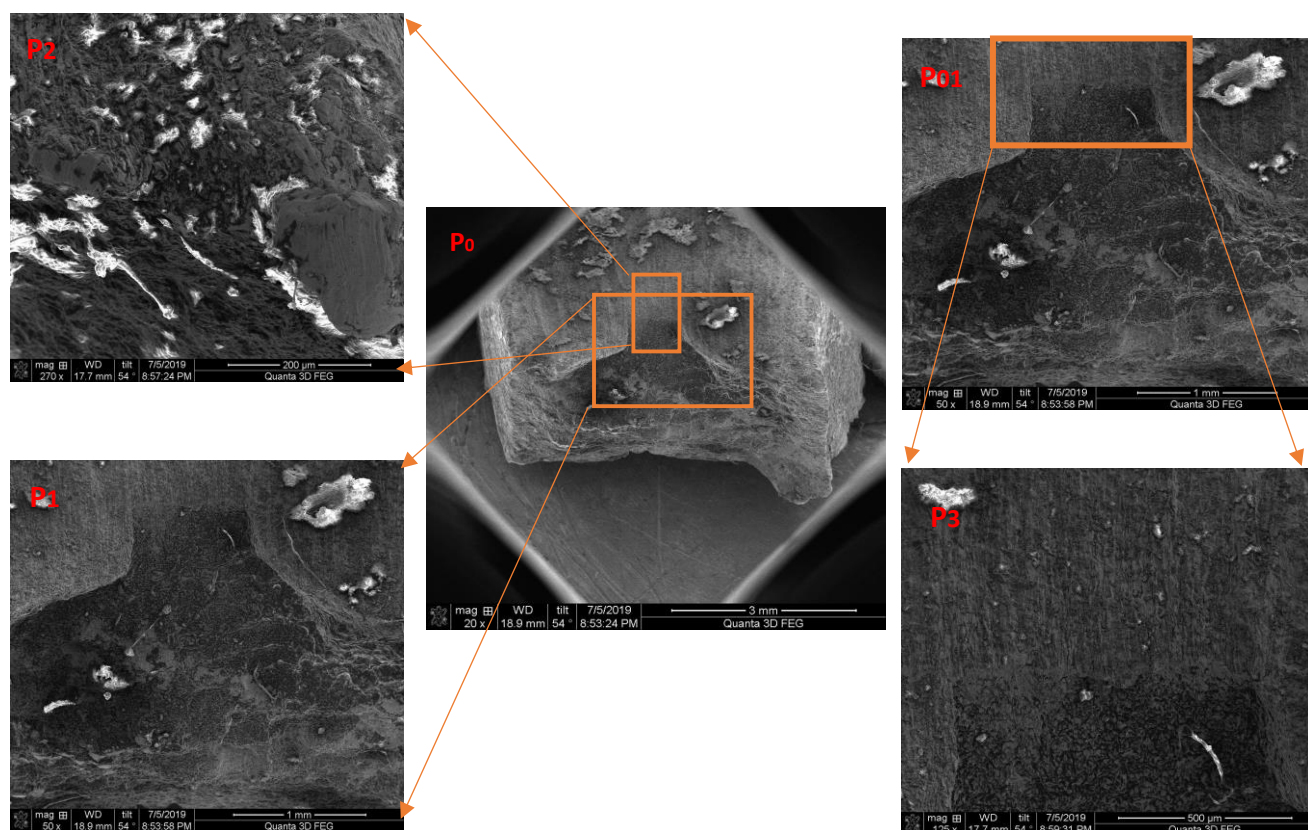
**P<sub>3</sub>: E,F,G.** Έχει γίνει μεγέθυνση **404x,1248x,1754x**. Η περιοχή **P<sub>3</sub>** αντιστοιχεί στην πάνω αριστερά περιοχή όπως περιγράφεται από την εικόνα **P<sub>0</sub>**. Από τις διαθέσιμες μεγεθύνσεις μπορούμε να καταλήξουμε στα ίδια συμπεράσματα με τις περιοχές **P<sub>1</sub>,P<sub>2</sub>** σχετικά με την παρουσία των dimples, τα οποία στην προκειμένη περίπτωση βρίσκονται στο εγκάρσιο επίπεδο συγκριτικά με το επίπεδο της εικόνας.

## P4



**P<sub>4</sub>: H,I,J.** Έχει γίνει μεγέθυνση **413x,1007x,2496x**. Η περιοχή αυτή βρίσκεται στο πάνω δεξιό τμήμα της περιοχής θραύσης, όπου έχει δημιουργηθεί μια χαρακτηριστική κοιλάδα όπως φαίνεται και στην εικόνα **P<sub>0</sub>**. Ισχύουν όσα αναφέρθηκαν και στις προηγούμενες εικόνες.

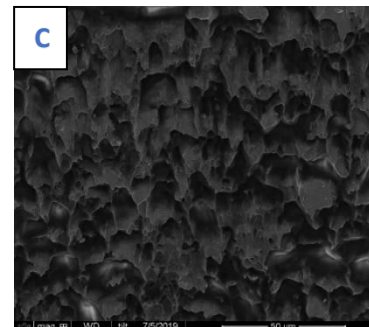
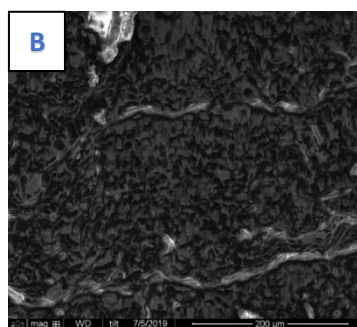
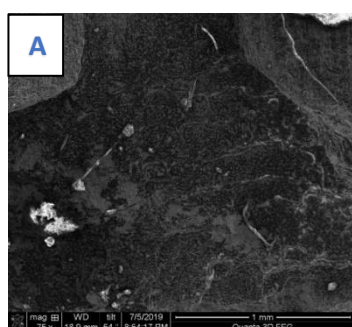
[2] Δοκίμιο 12/Με αστάρι/Εμβάπτιση σε NaCl 15 ημέρες



Σχόλια σχετικά με την περιοχή θραύσης του δοκιμίου 12:

Όπως είδαμε από το συνοπτικό πίνακα του SEM πρόκειται για δοκίμιο με αστάρι που διαβρώθηκε για 15 μέρες σε λουτρό εμβάπτισης NaCl. Οι εικόνες **P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>**, **P<sub>3</sub>** αντιστοιχούν στις περιοχές της εικόνας **P<sub>0</sub>** όπως αυτές έχουν σημειωθεί και μεγεθυνθεί.

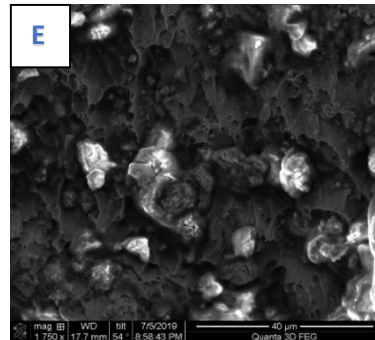
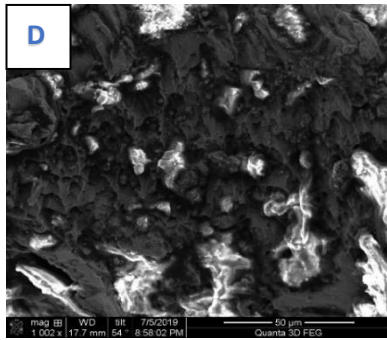
**P<sub>1</sub>**



**P<sub>1</sub>: A,B,C.** Έχει γίνει μεγέθυνση **75x, 324x, 1000x** αντίστοιχα. Η περιοχή **P<sub>1</sub>** αντιστοιχεί σε κεντρική περιοχή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου 12. Οι μεγεθύνσεις είναι σχετικά μικρές και μόνο στην εικόνα **C** μπορούμε να παρατηρήσουμε την ύπαρξη των dimples. Στις εικόνες **A,B** φαίνονται προϊόντα οξείδωσης με τις χαρακτηριστικές λευκές ζώνες.

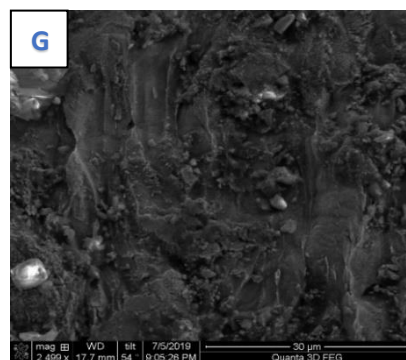
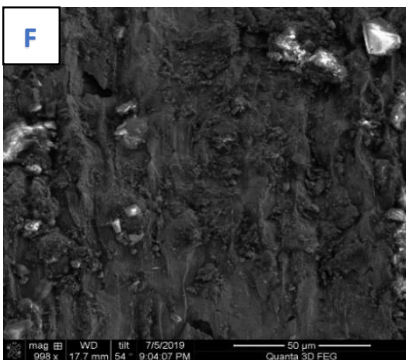


## P2



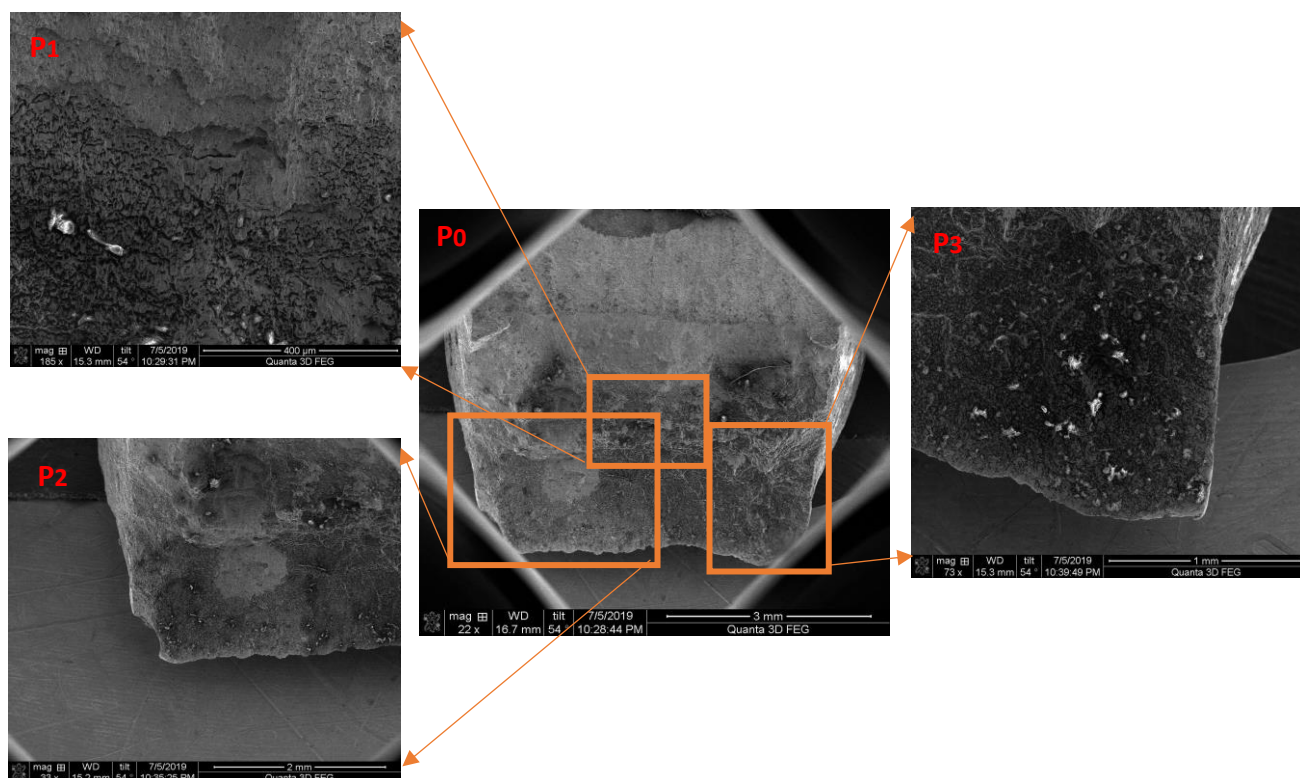
**P<sub>2</sub>:D,E.** Έχει γίνει μεγέθυνση **1002x** και **1750x** αντίστοιχα. Η περιοχή **P<sub>2</sub>**, μέρος της οποίας βρίσκεται και στην περιοχή **P<sub>1</sub>**, αντιστοιχεί σε κοιλάδα που έχει διαμορφωθεί στο κεντρικό τμήμα της περιοχής θραύσης. Στις εικόνες **D,E** μπορούμε να εντοπίσουμε την ύπαρξη προϊόντων οξείδωσης και σκόνης.

## P3



**P<sub>3</sub>:F,G.** Έχει γίνει μεγέθυνση **998x** και **2499x**. Η περιοχή **P<sub>3</sub>** πρόκειται για εστίαση της περιοχής **P<sub>1</sub>** σε διαφορετικό πλάτος της επιφάνειας θραύσης. Στην περιοχή αυτή υπάρχει συνύπαρξη τόσο της όλκιμης όσο και της ψαθυρής θραύσης. Η ψαθυρή θραύση έχει πραγματοποιηθεί σε διεύθυνση σχεδόν κάθετη της εφαρμοζόμενης εφελκυστικής τάσης.

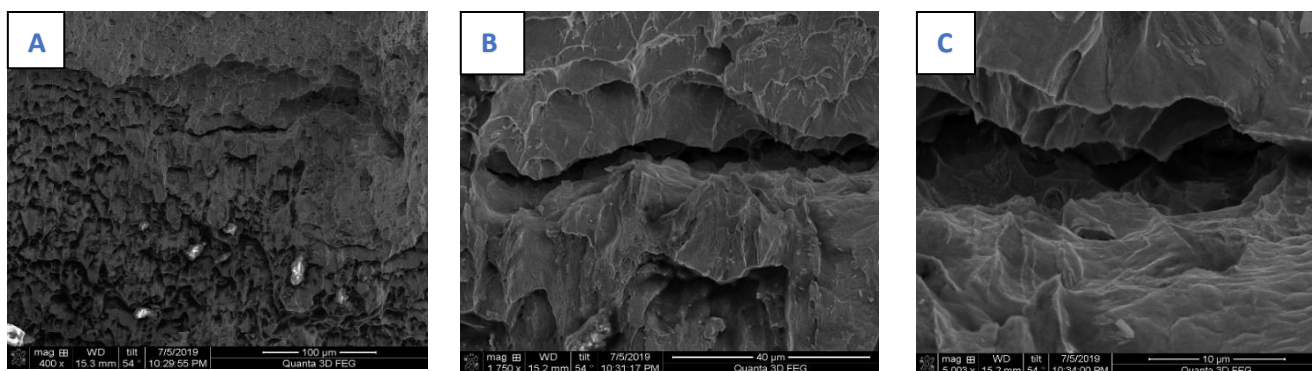
[3] Δοκίμιο 15/ Χωρίς αστάρι/Εμβάπτιση σε NaCl 15 ημέρες



Σχόλια σχετικά με την περιοχή θραύσης του δοκιμίου 15:

Όπως είδαμε από το συνοπτικό πίνακα του SEM πρόκειται για δοκίμιο χωρίς αστάρι που διαβρώθηκε για 15 μέρες σε λουτρό εμβάπτισης NaCl. Οι εικόνες **P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>**, **P<sub>3</sub>** αντιστοιχούν στις περιοχές της εικόνας **P<sub>0</sub>** όπως αυτές έχουν σημειωθεί και μεγεθυνθεί.

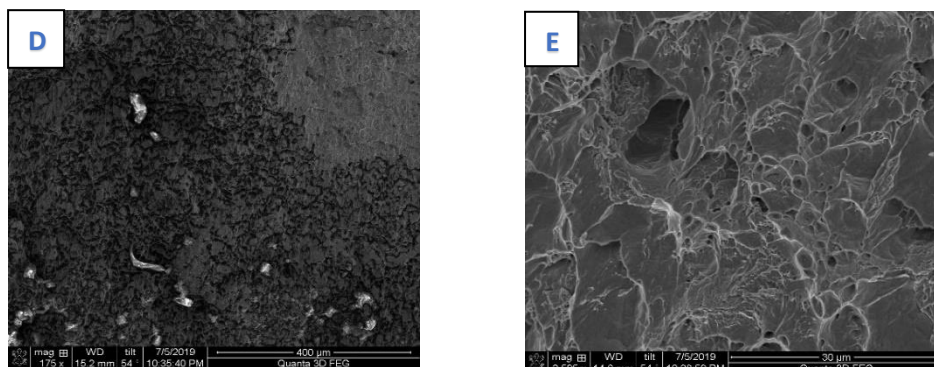
**P<sub>1</sub>**



**P<sub>1</sub>: A,B,C.** Έχει γίνει μεγέθυνση **400x, 1750x, 5003x** αντίστοιχα. Η περιοχή **P<sub>1</sub>** αντιστοιχεί σε κεντρική περιοχή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου 15. Η περιοχή **P<sub>1</sub>** μας δίνει σημαντικές πληροφορίες λόγω της περιοχής εστίασης και της μεγέθυνσης που επιτεύχθηκε. Συγκεκριμένα, στην εικόνα **A** παρατηρούμε στο κάτω αριστερά τμήμα την ύπαρξη των dimples ενώ στο πάνω δεξιά τμήμα εντοπίζονται χαρακτηριστικές ρωγμές στην επιφάνεια

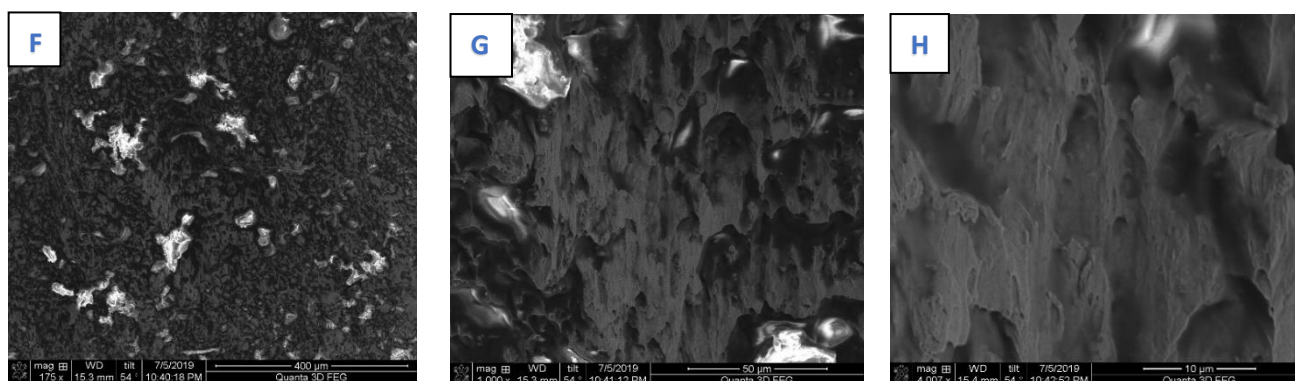
θραύσης. Πρόκειται για ενδιάμεση θραύση. Στην εικόνα **B** παρατηρούμε την ανάπτυξη μικρορωγμής, η οποία διασχίζει τα όρια των κόκκων. Η διαδικασία αυτή ονομάζεται σχισμός και το είδος θραύσης είναι η ενδοκοκκώδης ή ενδοκρυσταλλική θραύση, καθώς οι ρωγμές θραύσης περνούν μέσα από τους κόκκους. Στο αριστερό τμήμα της εικόνας **C** παρατηρούμε ότι η ρωγμή αναπτύσσεται και καταλαμβάνει μεγαλύτερη περιοχή λόγω πλαστικής παραμόρφωσης. Τέλος, παρατηρούμε ότι η ρωγμή έχει την τάση να αναπτύσσεται σε γωνία  $45^\circ$  ως προς τη διεύθυνση της εφελκυστικής θραύσης. Το φαινόμενο αυτό είναι χαρακτηριστικό της όλκιμης θραύσης.

## P2



**P<sub>2</sub>: D,E.** Έχει γίνει μεγέθυνση **175x** και **2505x**. Και στις 2 εικόνες παρατηρούμε την ύπαρξη των dimples στην εγκάρσια διεύθυνση, χαρακτηριστικό της όλκιμης θραύσης. Στην εικόνα **E** φαίνεται να έχουν θραυστεί σε επίπεδο μικροδομής ορισμένες κρυσταλλικές περιοχές, πιθανόν λόγω ψαθυρής θραύσης. Η ανάπτυξη μικρορωγμών, οι οποίες δεν αναπτύσσονται περαιτέρω διατμητικά αλλά οδηγούν σε θραύση του υλικού, είναι χαρακτηριστικό της ψαθυρής θραύσης.

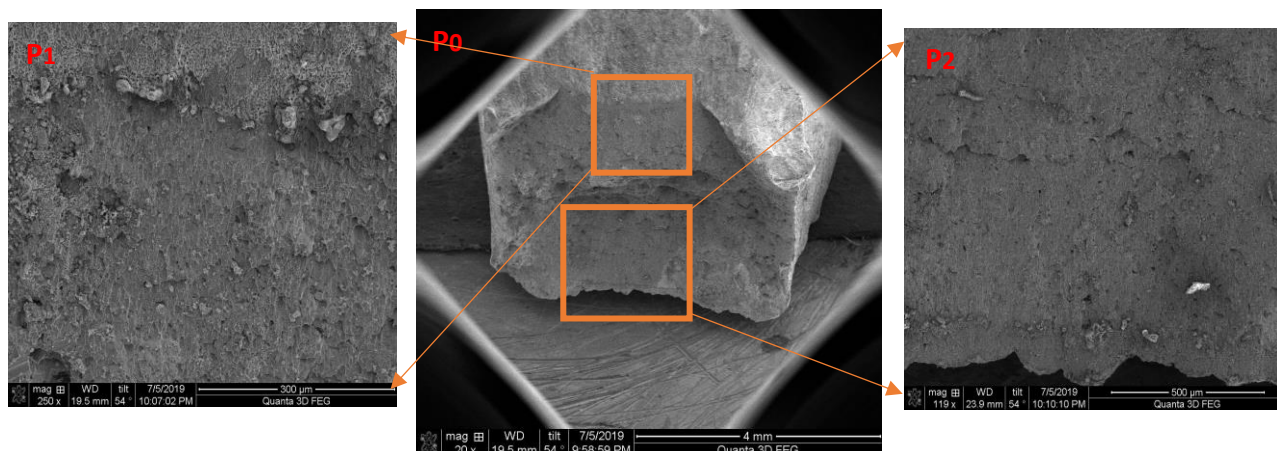
## P3



**P<sub>3</sub>: F,G,H.** Έχει γίνει μεγέθυνση **175x, 1000x, 4007x**. Ισχύουν όσα αναφέρθηκαν στις περιοχές **P<sub>1</sub>** και **P<sub>2</sub>**. Επίσης παρατηρούνται άσπρα στίγματα και ζώνες που αντιστοιχούν σε προϊόντα οξείδωσης και σκόνη.



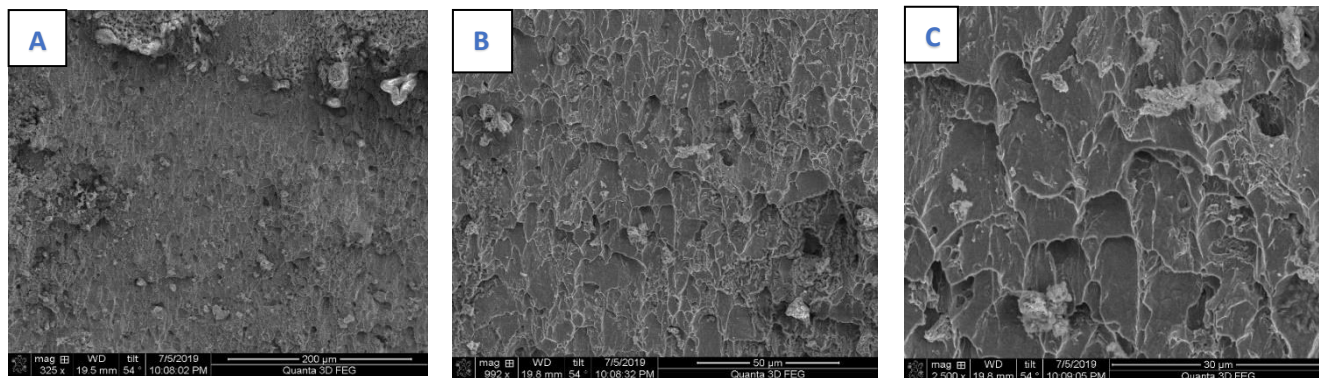
[4] Δοκίμιο 16/Χωρίς αστάρι/Αλατονέφωση/30 ημέρες



Σχόλια σχετικά με την περιοχή θραύσης του δοκιμίου 16:

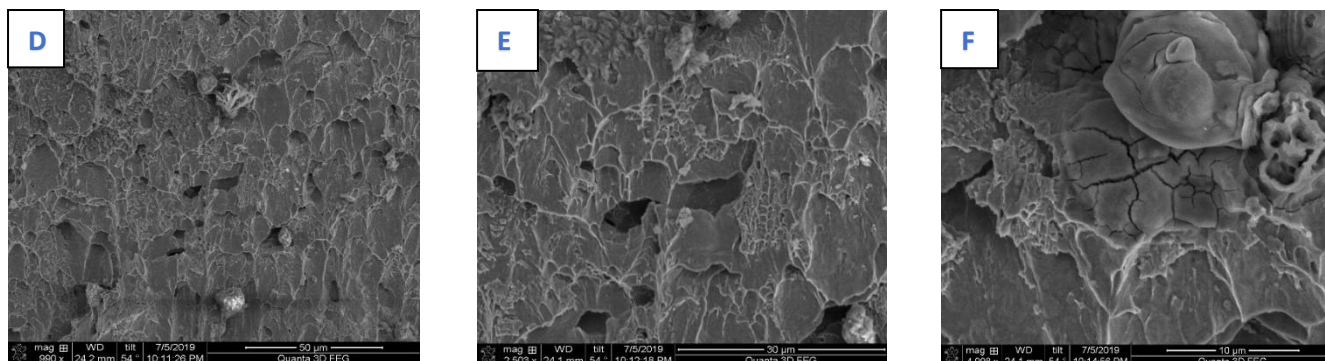
Όπως είδαμε από το συνοπτικό πίνακα του SEM πρόκειται για δοκίμιο χωρίς αστάρι που διαβρώθηκε για 30 μέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης. Οι εικόνες **P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>** αντιστοιχούν στις περιοχές της εικόνας **P<sub>0</sub>** όπως αυτές έχουν σημειωθεί και μεγεθυνθεί.

**P<sub>1</sub>**



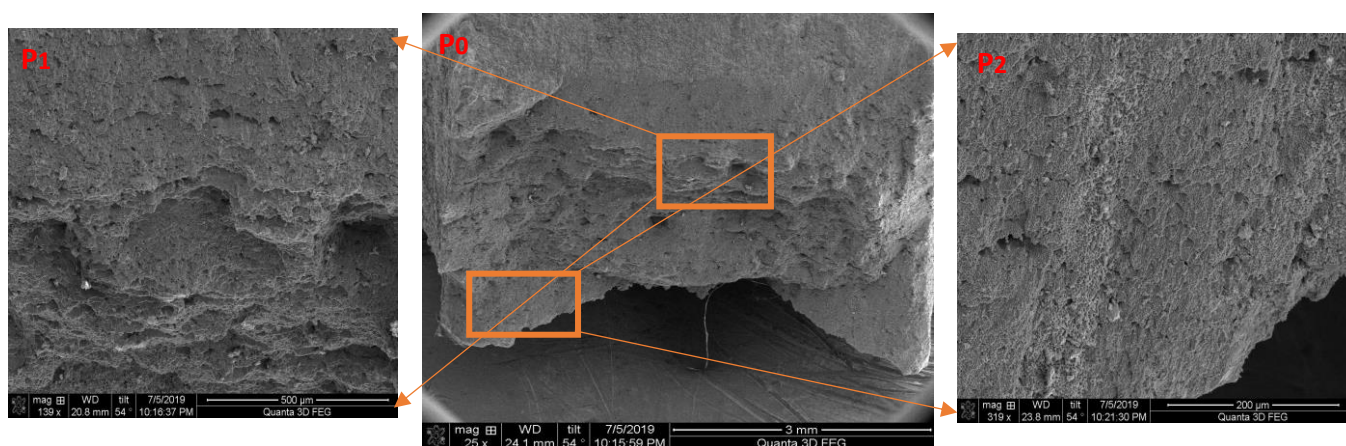
**P<sub>1</sub>: A,B,C.** Έχει γίνει μεγέθυνση **325x, 992x, 2500x** αντίστοιχα. Η περιοχή **P<sub>1</sub>** αντιστοιχεί στην άνω περιοχή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου 16. Και στις 3 εικόνες **A,B,C**, λόγω της διαθέσιμης μεγέθυνσης, παρατηρούμε την ανάπτυξη των dimples στην εγκάρσια διεύθυνσης της επιφάνειας θραύσης.

**P<sub>2</sub>**



**P<sub>2</sub>: D,E,F.** Έχει γίνει μεγέθυνση **990x, 2503x,4998x** αντίστοιχα. Πρόκειται για περιοχή που βρίσκεται στο κάτω ακραίο τμήμα της επιφάνειας θραύσης. Στις εικόνες **D** και **E** της περιοχής **P<sub>2</sub>** ισχύουν όσα αναφέρθηκαν και στις εικόνες **A,B,C** της περιοχής **P<sub>1</sub>**. Ωστόσο στην εικόνα **F** μπορούμε να παρατηρήσουμε τα εξής: Συνύπαρξη όλκιμης και ψαθυρής θραύσης λόγω παρουσίας τόσο των dimples όσο και των μικρορωγμών. Επίσης, παρατηρείται διάδοση μικρορωγμών σε πολλές διαφορετικές διευθύνσεις, χαρακτηριστικό της ψαθυρότητας που διακρίνει μια περιοχή. Αν και δεν μπορούμε να είμαστε σίγουροι λόγω της υπάρχουσας μεγέθυνσης, η ψαθυρή θραύση που πραγματοποιείται είναι ενδοκρυσταλλική, λόγω των πολλών διευθύνσεων εξάπλωσης των μικρορωγμών σε μια συγκεκριμένη περιοχή.

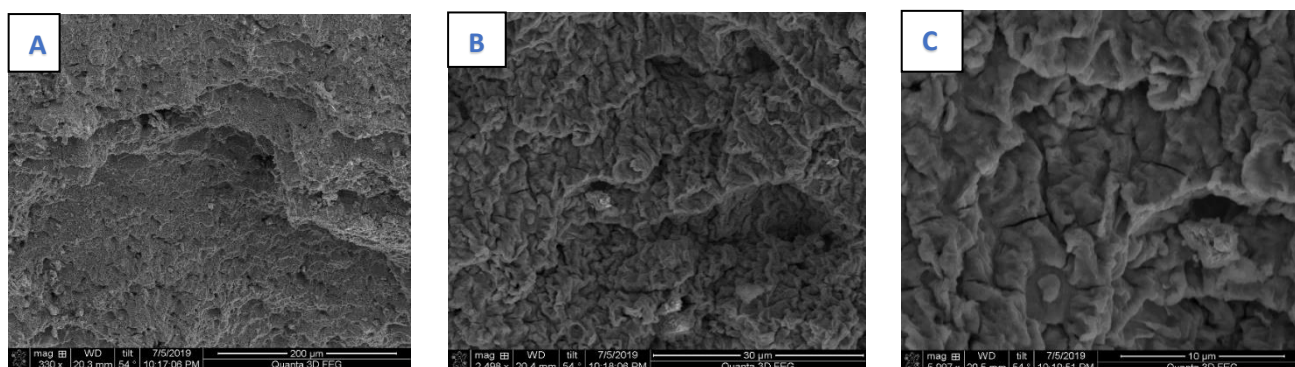
#### [5] Δοκίμιο 30/Χωρίς αστάρι/Αλατονέφωση/60 ημέρες



#### Σχόλια σχετικά με την περιοχή θραύσης του δοκιμίου 30:

Όπως είδαμε από το συνοπτικό πίνακα του SEM πρόκειται για δοκίμιο χωρίς αστάρι που διαβρώθηκε για 60 μέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης. Οι εικόνες **P<sub>1</sub>,P<sub>2</sub>** αντιστοιχούν στις περιοχές της εικόνας **P<sub>0</sub>** όπως αυτές έχουν σημειωθεί και μεγεθυνθεί.

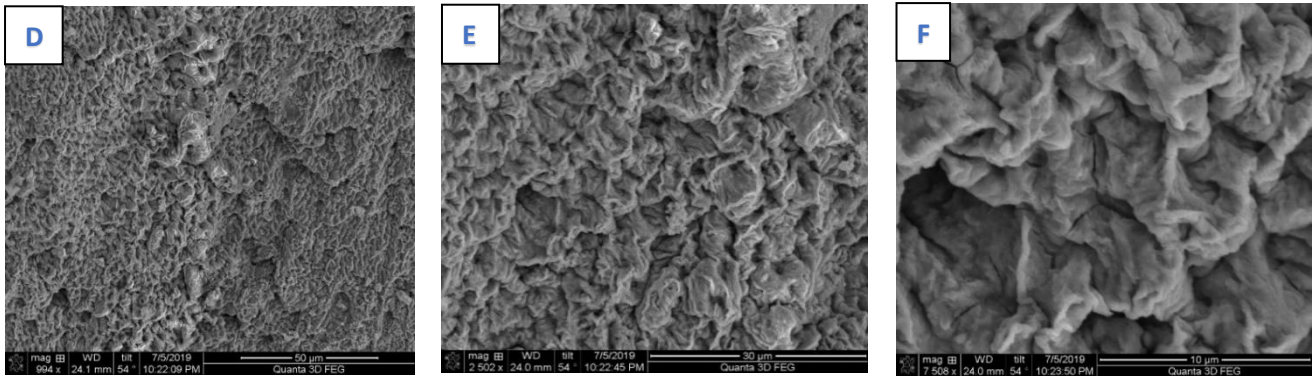
#### **P<sub>1</sub>**



**P<sub>1</sub>: A,B,C.** Έχει γίνει μεγέθυνση **330x, 2498x,5997x** αντίστοιχα. Η περιοχή **P<sub>1</sub>** αντιστοιχεί σε κεντρική περιοχή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου 30. Και στις 3 εικόνες **A,B,C**, λόγω της διαθέσιμης μεγέθυνσης, παρατηρούμε την ανάπτυξη των dimples στην εγκάρσια διεύθυνση της επιφάνειας θραύσης. Επιπρόσθετα, στην εικόνα **C** παρατηρούμε την ανάπτυξη μικρορωγμών στην επιφάνεια των dimples. Πρόκειται για ενδιάμεση θραύση, όπως άλλωστε συμπεράναμε και στις προηγούμενες εικόνες.

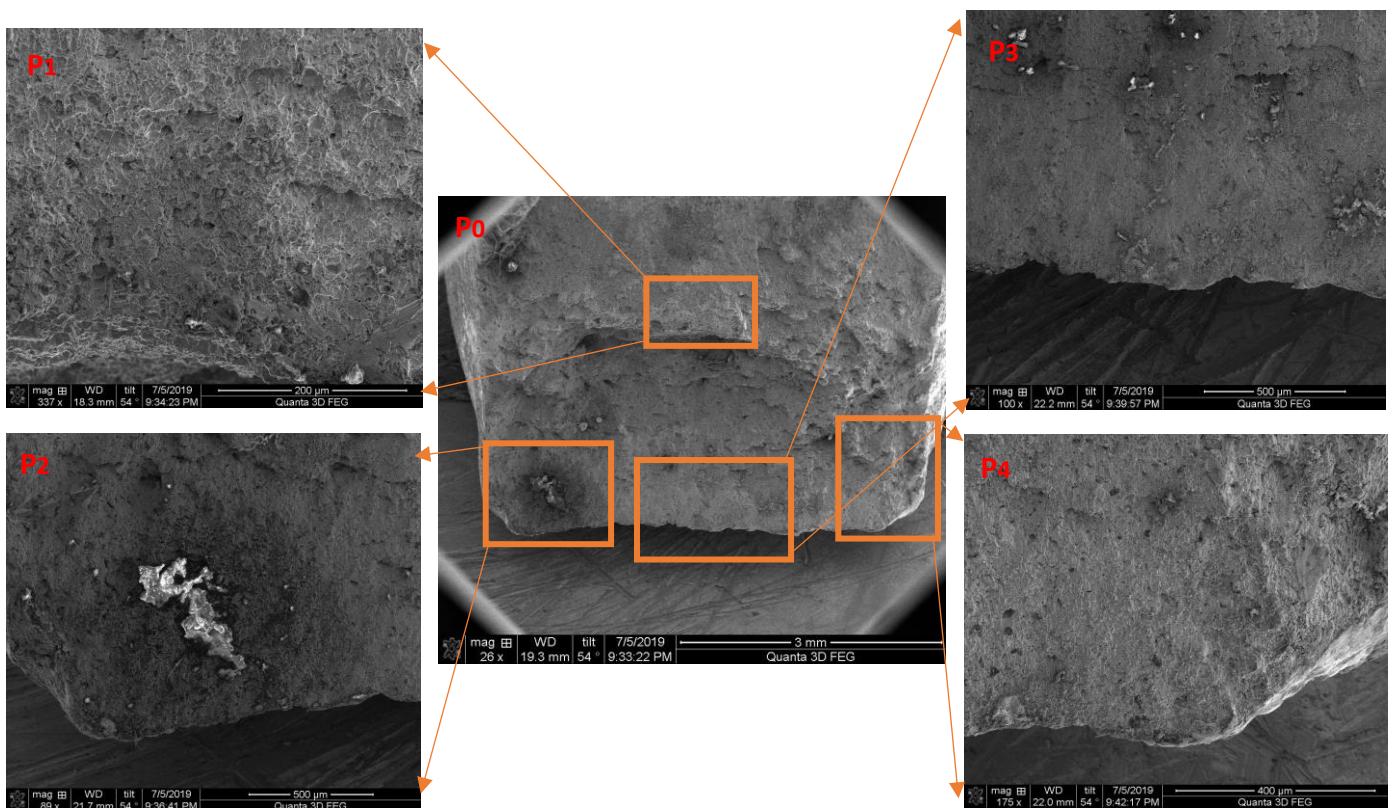


**P<sub>2</sub>**



**P<sub>2</sub>: D,E,F.** Έχει γίνει μεγέθυνση **994x,2502x,7508x** αντίστοιχα. Η περιοχή **P<sub>2</sub>** βρίσκεται στο κάτω αριστερά ακραίο σημείο της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου 30 και το οπτικό αποτέλεσμα ταυτίζεται με της περιοχής **P<sub>1</sub>**.

**[6] Δοκίμιο 7/Με αστάρι/Αλατονέφωση/30 ημέρες**

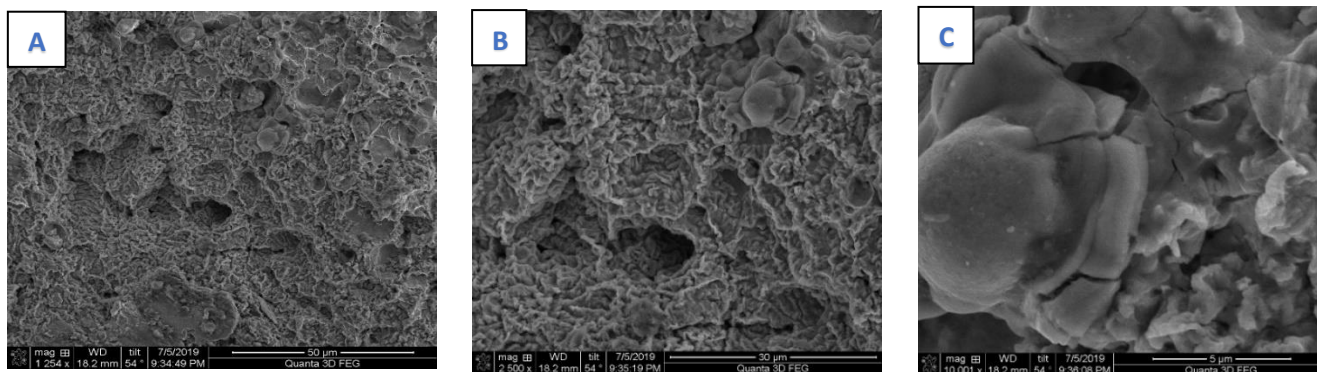


Σχόλια σχετικά με την περιοχή θραύσης του δοκιμίου 7:

Όπως είδαμε από το συνοπτικό πίνακα του SEM πρόκειται για δοκίμιο με αστάρι που διαβρώθηκε για 30 μέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης. Οι εικόνες **P<sub>1</sub>,P<sub>2</sub>,P<sub>3</sub>,P<sub>4</sub>** αντιστοιχούν στις περιοχές της εικόνας **P<sub>0</sub>** όπως αυτές έχουν σημειωθεί και μεγεθυνθεί.

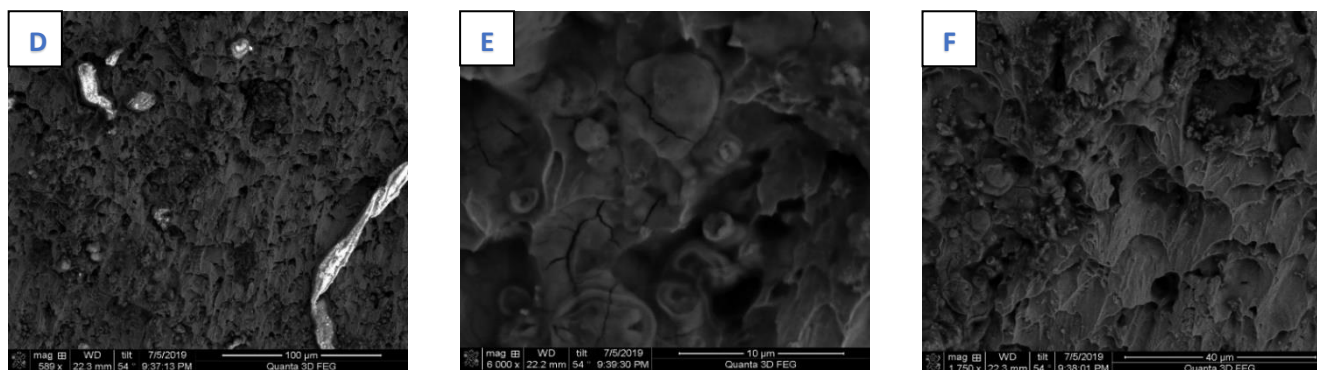


## P1



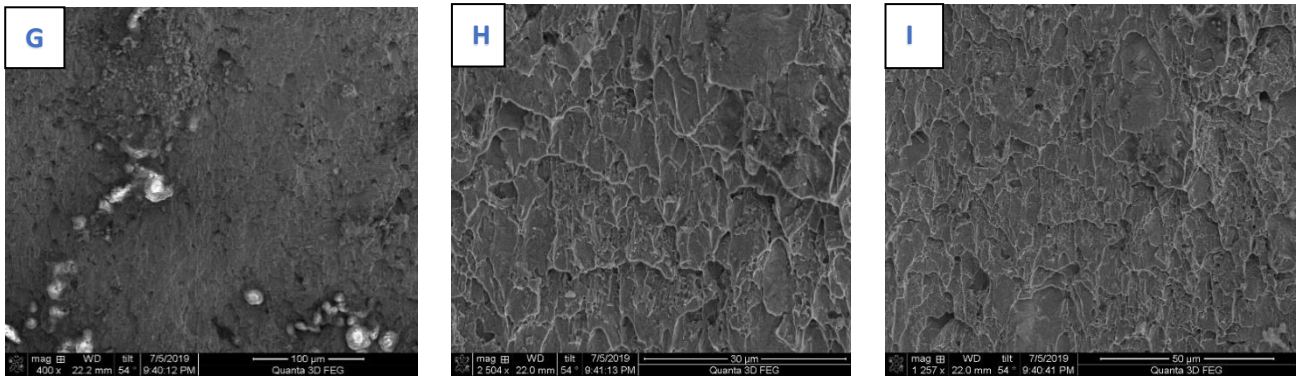
**P<sub>1</sub>: A,B,C.** Έχει γίνει μεγέθυνση **1254x, 2500x, 10001x** αντίστοιχα. Η περιοχή **P<sub>1</sub>** αντιστοιχεί στην άνω περιοχή της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου 7. Και στις 3 εικόνες **A,B,C**, μπορούμε να οδηγηθούμε στο συμπέρασμα ότι πραγματοποιείται ενδιάμεση θραύση του δοκιμίου. Στις εικόνες **A,B**, παρατηρούμε την ανάπτυξη των dimples στην εγκάρσια διεύθυνση σε σχέση με την επιφάνεια θραύσης που βλέπουμε στις εικόνες. Επίσης, παρατηρούμε την εμφάνιση μικρών “σπηλιών” οι οποίες προφανώς δημιουργήθηκαν λόγω ανάπτυξης μικρορωγμών στα σημεία αυτά. Οι μικρορωγμές αυτές δεν αναπτύχθηκαν περαιτέρω (πλαστική παραμόρφωση) παρά συγκεντρώθηκαν και οδήγησαν σε θραύση τμήματα της επιφάνειας που μελετάμε. Στην εικόνα C, έχουμε εστίαση κατάλληλα σε ένα dimple πάνω στο οποίο έχουν αναπτυχθεί πολλές μικρορωγμές σε διάφορες κατευθύνσεις.

## P2



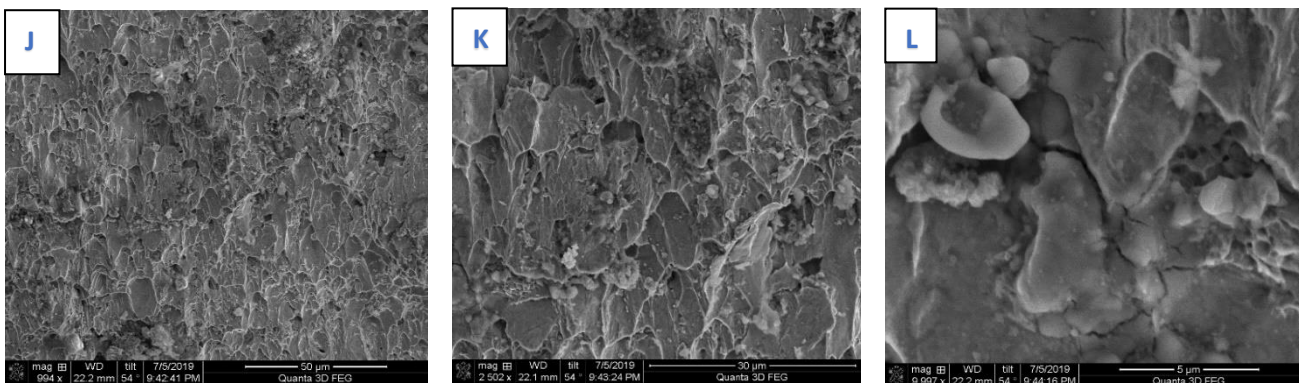
**P<sub>2</sub>:D,E,F.** Έχει γίνει μεγέθυνση **589x, 6000x και 1750x** αντίστοιχα. Η περιοχή **P<sub>2</sub>** αντιστοιχεί στο κάτω αριστερά τμήμα της επιφάνειας θραύσης. Στις εικόνες αυτές παρατηρούμε την ανάπτυξη των dimples και την εξάπλωση μικρορωγμών σε αυτά, χαρακτηριστικό της ενδιάμεσης θραύσης. Οι λευκές ζώνες αντιστοιχούν σε προϊόντα οξείδωσης και σκόνη.

### P<sub>3</sub>



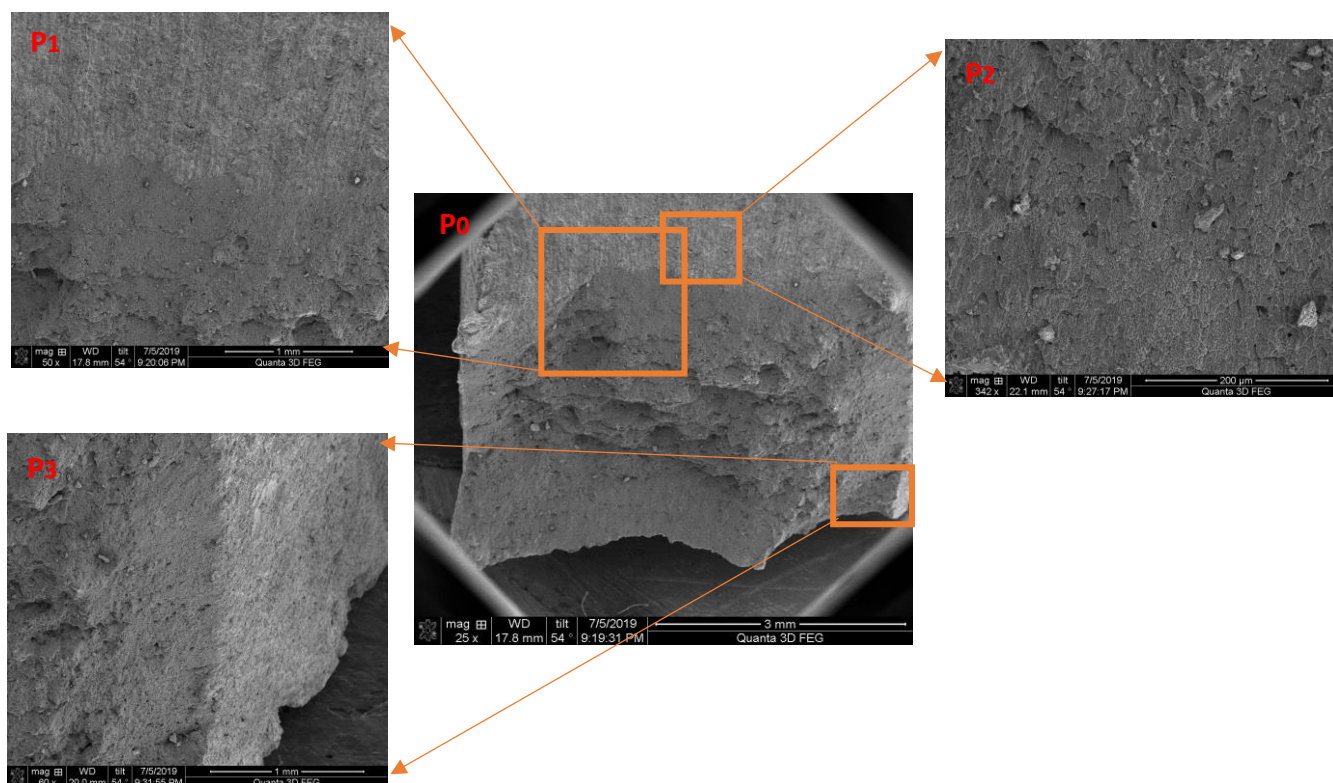
**P<sub>3</sub>: G,H,I:** Έχει γίνει μεγέθυνση **400x,2504x,1257x**. Η περιοχή **P<sub>3</sub>** αντιστοιχεί σε κεντρικό αλλά ακραίο σημείο της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου 7. Και στις 3 εικόνες παρατηρούμε την εξάπλωση των dimples λόγω της πλαστικής παραμόρφωσης που έχει επέλθει η περιοχή που μελετάμε.

### P<sub>4</sub>



**P<sub>4</sub>: J,K,L:** Έχει γίνει μεγέθυνση **994x,2502x,9997x**. Πρόκειται για περιοχή που βρίσκεται στο κάτω δεξιό τμήμα της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου 7. Και στις 3 εικόνες παρουσιάζονται χαρακτηριστικά ενδιάμεσης θραύσης. Στις εικόνες **J,K** παρατηρούμε την ανάπτυξη των dimples στο εγκάρσιο επίπεδο ως προς το επίπεδο θραύσης ενώ συγχρόνως εντοπίζονται μικρές “σπηλιές” λόγω πιθανής θραύσης και αποκόλλησης του υλικού από την ανάπτυξη μικρορωγμών στα σημεία αυτά. Στην εικόνα **L**, παρατηρούμε την ανάπτυξη μικρορωγμών πάνω στα dimples. Οι μικρορωγμές αυτές αναπτύσσονται σε διαφορετικές διευθύνσεις και είναι ενδεικτικές της ενδοκρυσταλλικής θραύσης του υλικού, καθώς διασχίζουν την επιφάνεια των κόκκων.

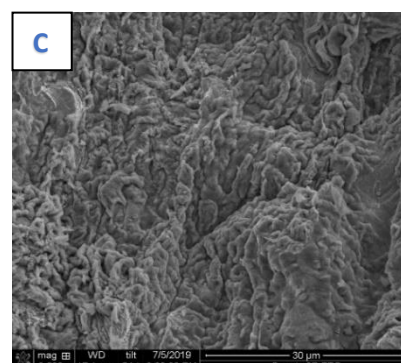
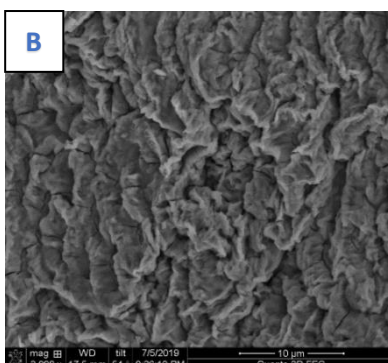
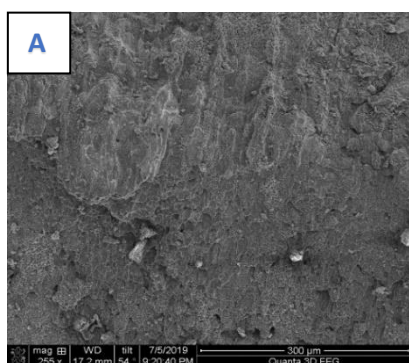
[7] Δοκίμιο 31/Με αστάρι/Αλατονέφωση/60 ημέρες



Σχόλια σχετικά με την περιοχή θραύσης του δοκιμίου 31:

Όπως είδαμε από το συνοπτικό πίνακα του SEM πρόκειται για δοκίμιο με αστάρι που διαβρώθηκε για 60 μέρες σε θάλαμο αλατονέφωσης. Οι εικόνες **P<sub>1</sub>**, **P<sub>2</sub>**, **P<sub>3</sub>** αντιστοιχούν στις περιοχές της εικόνας **P<sub>0</sub>** όπως αυτές έχουν σημειωθεί και μεγεθυνθεί.

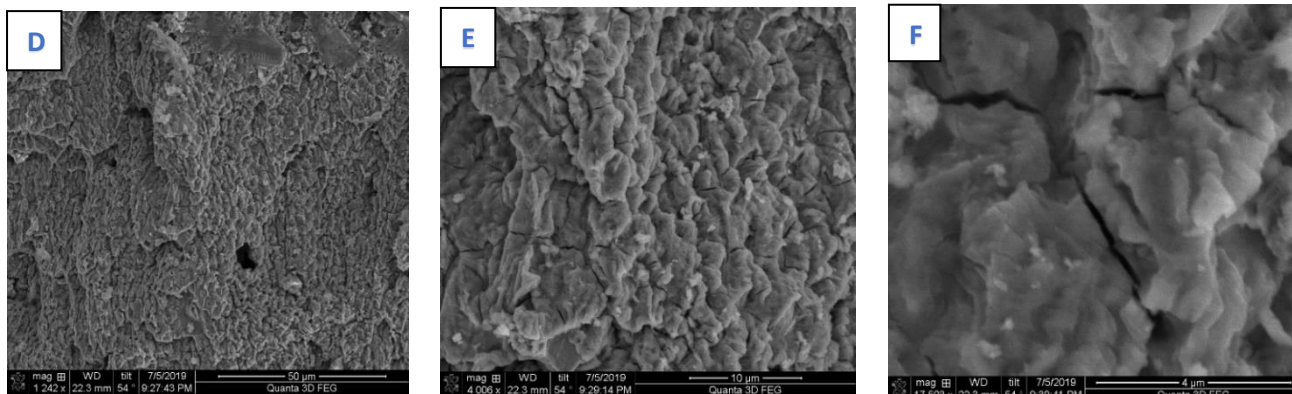
**P<sub>1</sub>**



**P<sub>1</sub>:A,B,C.** Έχει γίνει μεγέθυνση **255x,3990x και 2500x** αντιστοίχα. Η περιοχή **P<sub>1</sub>** αντιστοιχεί σε άνω περιοχή της επιφάνειας θραύσης. Στις εικόνες B,C παρατηρούμε την ανάπτυξη των dimples στην επιφάνεια θραύσης.

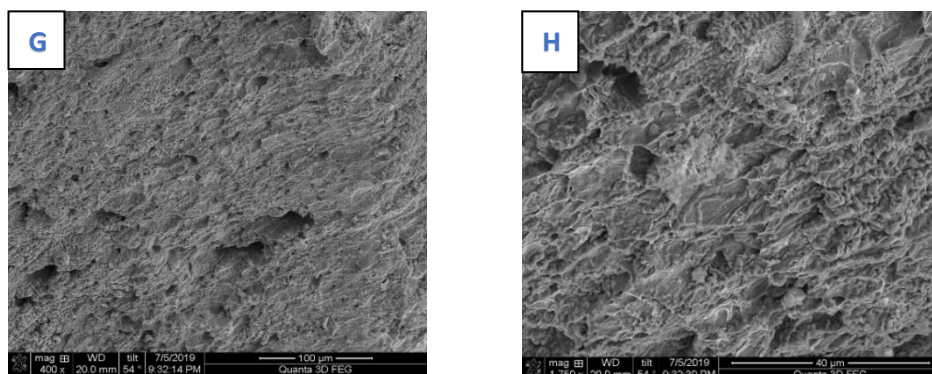


## P2



**P<sub>2</sub>:D,E,F.** Έχει γίνει μεγέθυνση **1242x,4006x,17503x** αντίστοιχα. Η περιοχή **P<sub>2</sub>** αντιστοιχεί σε άνω τμήμα της επιφάνειας θραύσης. Και στις 3 εικόνες παρατηρούμε ότι πραγματοποιείται ενδιάμεση θραύση λόγω της ανάπτυξης των dimples και των μικρορωγμών που αναπτύσσονται πάνω σε αυτά. Στην εικόνα **F**, λόγω της μεγάλης μεγέθυνσης που έχει πραγματοποιηθεί, μπορούμε να διακρίνουμε περιοχές που έχουν υποστεί σχισμό. Οι μικρορωγμές που έχουν αναπτυχθεί διαπερνούν τα σύνορα των κόκκων και διασχίζουν την επιφάνειά τους. Πρόκειται για συνδυασμό όλκιμης και ενδοκρυσταλλικής θραύσης.

## P3



**P<sub>3</sub>:G,H.** Έχει γίνει μεγέθυνση **400x και 1750x** αντίστοιχα. Η περιοχή **P<sub>3</sub>** βρίσκεται στο κάτω δεξιό ακραίο σημείο της επιφάνειας θραύσης του δοκιμίου 31. Όπως και προηγουμένως παρατηρούμε την ανάπτυξη των dimples στην εγκάρσια διεύθυνση καθώς και μικρών “σπηλιών” (πορώδη τμήματα) λόγω πιθανής ψαθυρής θραύσης στις περιοχές αυτές.